

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Г. В. Шимов, С. П. Буркин

**ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

*Рекомендовано методическим советом УрФУ
в качестве **учебного пособия** для студентов,
обучающихся по направлению 150400 «Металлургия»*

Под общей редакцией С. П. Буркина

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2014

УДК 621.7.01
ББК 34.62+31.19
Ш61

Рецензенты:

кафедра подъемно-транспортного оборудования Российского государственного профессионально-педагогического университета (зав. кафедрой – проф., д-р техн. наук В. В. Каржавин);
Генеральный директор ООО «Компания ИнТехМаш» А. Н. Колесов

Авторы: Шимов Г.В.

**Ш61 ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ:** учебное пособие / Г. В. Шимов, С.
П. Буркин; под общ. ред. С. П. Буркина. – Екатеринбург: Изд-во
Урал. ун-та, 2014. – 160 с.
ISBN 978-5-7996-1221-4

Рассмотрены общие вопросы ресурсо- и энергосбережения в процессах обработки металлов давлением. Представлены типовые технологические расчеты энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением. Приведены примеры технологических расчетов процессов ОМД.

Предназначено для изучения дисциплины «Основы технологических процессов ОМД» бакалаврами, обучающимися по направлению 150400 «Металлургия» по профилю «Обработка металлов давлением».

Библиогр.: 16 назв. Табл. 11. Рис. 34.

УДК 621.7.01
ББК 34.62

ISBN 978-5-7996-1221-4

© Уральский федеральный
университет, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| 1. РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ | 4 |
| 1.1. Проблемы и перспективы развития современной металлургии | 4 |
| 1.2. Общие вопросы проектирования техпроцессов..... | 13 |
| 1.3. Технологическое проектирование..... | 18 |
| 1.4. Перспективные направления развития заготовительного производства .. | 23 |
| 1.5. Технологии и машины интенсивных обжатий сортовых заготовок..... | 28 |
| 1.6. Совмещенные процессы литья-деформации..... | 41 |
| 1.7. Перспективные направления развития техники и технологииковки и штамповки..... | 53 |
| 1.8. Расчет энергосиловых параметров и энергосбережение при листовой прокатке..... | 61 |
| 1.9. Расчет энергосиловых параметров и энергосбережение при сортовой прокатке..... | 65 |
| 1.10. Расчет энергосиловых параметров и энергосбережение при прессовании | 71 |
| 1.11. Расчет энергосиловых параметров и энергосбережение при волочении | 79 |
| 1.12. Расчет энергосиловых параметров и энергосбережение при ковке и штамповке | 85 |
| 1.13. Трение в процессах ОМД и методы его снижения. Смазки. | 92 |
| 1.14. Способы определения коэффициента трения при ОМД..... | 97 |
| 1.15. Явление сверхпластичности и его использование в процессах ОМД... | 107 |
| 1.16. Остаточные напряжения и их влияние на качество производимой продукции | 113 |
| 2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОМД..... | 122 |
| ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО АНАЛИЗУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ | 146 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ДЛЯ БОЛЕЕ ГЛУБОКОГО ОСВОЕНИЯ МАТЕРИАЛА | 151 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 155 |

1. РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

1.1. Проблемы и перспективы развития современной металлургии

Как и для многих отраслей промышленности, для металлургии период кризиса может являться наиболее благоприятным временем осуществления реконструктивных мероприятий. Направленность технического перевооружения определяется из анализа большинства современных проблем металлургического производства, от решения которых зависит возможность уверенного выхода на мировой рынок не с минимально обработанными полуфабрикатами, а с готовой металлургической продукцией, отвечающей по номенклатуре и качеству требованиям стандартов промышленно развитых стран. Технологический прорыв сегодня возможен, в частности, за счет инновационной деятельности предприятий. Другой путь, не менее затратный, – закупка зарубежного оборудования, внедрение чужих технологий и использование чужого программного обеспечения систем автоматического управления этим оборудованием. Этот путь, хотя и считается большинством наших новоявленных руководителей производства безрисковым, ведет к экономической зависимости от многих зарубежных фирм и даже от действий правительств стран – поставщиков оборудования и технологий. Кроме того, использование, казалось бы, самых совершенных зарубежных машин и технологий полностью лишает наши предприятия интеллектуальной собственности, которая при грамотном использовании является на мировых рынках значительно более востребованным и эффективным товаром, чем та металлопродукция, которую позволили нам производить зарубежные промышленные «добродетели» и «доброжелатели» от политики. Поскольку современные менеджеры почему-то уверены, что можно управлять металлургией, не вникая в суть металлургических процессов, им трудно оценить технический уровень оборудования, совершенство технологии и особенно пригодность для эксплуатации в конкретных условиях потребителя алгоритмов, систем управления и программного обеспечения. Например, закупленные в 2006 году одним из отечественных предприятий многониточные волочильные

машины фирмы «Nihof» как наиболее современные и технически совершенные еще в 1974 году поставлялись в той же конфигурации алжирскому предприятию «Société National de cable». В те годы эти машины действительно можно было рассматривать в ряду наиболее технически продвинутых.

Каким бы путем ни осуществлялось техническое перевооружение металлургических заводов – закупкой зарубежных новинок или реализацией отечественных инновационных проектов, стратегия развития должна опираться на тенденции структурных изменений в мировой металлургии. Нельзя не обращать внимания при реконструкции существующих и строительстве новых предприятий на непрерывное изменение сырьевой базы металлургии, как черной, так и цветной. Уже неразумно не осваивать переработку полиметаллических руд в черной металлургии со сравнительно низким содержанием железа. Если при глубоком обогащении титансодержащей железной руды титан отправляется в «хвосты», а затем титановый концентрат закупается за рубежом, то такая переработка руды свидетельствует лишь о примитивном технологическом состоянии занятых в этом процессе предприятий. Можно непрерывно изучать и доводить до совершенства доменный процесс и системы управления процессом твердофазного восстановления, не обращая внимания на возрастающий дефицит коксующихся каменных углей. Процесс без сомнения наиболее эффективен по энергозатратам на выплавку чугуна благодаря его низкой температуре плавления. Однако экономическая целесообразность использования этого процесса может нивелироваться затратами на приобретение коксующегося угля и на производство агломерата. В технологиях выплавки низко- и безуглеродистых сталей производство чугуна вообще абсурдно. Сначала железо насыщается углеродом, а затем на последующих переделах ценой значительных энерго- и трудозатрат и со значительными потерями металла избавляются от этого углерода. Сюда привлекаются новейшие достижения зарубежной технологии для сложной внепечной обработки стали. Продувка аргоном, вакуумирование печь-ковшей большой емкости – технологически эффективные, но крайне дорогостоящие мероприятия.

По мере снижения содержания железа в рудах все актуальнее становится проблема переработки полиметаллических руд, иначе в скором времени черная металлургия станет нерентабельной.

В отечественной алюминиевой промышленности все сориентировано на выплавку алюминия электролизом из глиноземно-криолитового расплава. Байеровский процесс получения глинозема преимущественно нацелен на переработку бокситов. Пока в промышленном производстве даже не предпринимаются попытки получать алюминий из кианитовых руд. К таким технологиям рано или поздно придется обращаться из-за истощения бокситовых месторождений или из-за сложности добычи при большой глубине залегания балансовых бокситов (с понижением содержания SiO_2). Медеплавильные заводы, перерабатывающие сульфидные руды в основном в целях энергосбережения, не готовы к использованию в качестве сырья окисленных медных руд.

Переход всех подразделений металлургического комплекса на иные рудные ресурсы и другие вспомогательные материалы неизбежен и должен быть учтен при разработке стратегий технического перевооружения и строительстве новых металлургических предприятий.

Не менее важной проблемой всей металлургической отрасли можно считать энергосбережение. Металлургия занимает далеко не последнее место среди энергопотребителей, поэтому непрерывное и, очевидно, бесконечное удорожание всех энергоносителей заставит пересмотреть известные способы производства металла и выбирать из них наименее энергоемкие. Даже если дело обстоит благополучно с запасами балансовых бокситов и доведены до совершенства процессы получения глинозема и криолита, от электролизного получения алюминия в скором времени придется отказаться из-за чрезвычайно высокого потребления электроэнергии. Если решить проблемы газопроницаемости шахты доменной печи и десульфурации чугунов, то в плане энергосбережения этот агрегат еще долгое время может рассматриваться как абсолютно энергоэкономичный, поскольку все известные сейчас процессы бескоксовой металлургии, в частности твердофазное восстановление во вращающихся трубчатых печах, по энергоемкости проигрывают доменной печи. Использование в качестве восстанавливающей среды конвертированного природного газа может рассматриваться как эффективное до поры до времени, пока газ остается сравнительно дешевым. Процессы жидкофазного восстановления, привлекательные широкими технологическими возможностями, по энергопотреблению всегда будут проигрывать современ-

ным способам твердофазного восстановления металлов из оксидсодержащей шихты.

Как бы ни были сложны технологии и комплексы оборудования для прямого совмещения процессов обработки металла, ими придется серьезно заниматься для исключения промежуточных нагревов металла в цикле пластической и термической обработки. Известно, что при производстве металлоизделий, начиная с выплавки металлов и сплавов, до 80 % энергии тратится на нагрев. Доля затрат на деформационную обработку в большинстве техпроцессов незначительна. Идеальным процессом выпуска металлургической продукции следует считать такой, при котором металл нагревается один раз при выплавке и вся дальнейшая обработка (литье, прокатка, прессование, ковка) в горячем состоянии выполняется с плавильного нагрева. В технологиях производства холоднодеформированных металлоизделий важным при дорогих энергоносителях является предельно возможное сокращение промежуточных термических обработок для снятия наклепа. Для многих сплавов, в частности на основе меди и коррозионно-стойких сталей, промежуточные отжиги проводятся после каждого, перехода из-за быстрой потери пластичности при деформационном упрочнении. Если новая технология позволит в горячем состоянии деформировать заготовку до предготовых размеров и, более того, даст возможность после деформации сразу (без дополнительного нагрева) осуществить конечную термическую обработку, то такую технологию необходимо рассматривать, как энергосберегающую.

Технологическое развитие металлургических производств в ближайшее время пойдет по пути сокращения доли горячей пластической обработки в общем цикле производства металлоизделий. Отливка заготовок, по конфигурации и размерам близким к готовой продукции, уже широко применяется и, без сомнения, будет активно развиваться и совершенствоваться. Получение тонкослябовой непрерывнолитой заготовки уже позволило отказаться от обжимной прокатки и получать горячекатаную полосу толщиной до 0,8 мм, что существенно снижает энергозатраты на холодную прокатку листа. При производстве лент из медных сплавов удастся без промежуточных нагревов и даже подогревов получать в непрерывной линии совмещенных агрегатов тонкую качественную ленту из достаточно тонкой непрерывнолитой полосы. Правда, эта технология пока не применяется в черной металлургии, но особых препятствий на пути ее вне-

дрения в производство стальных лент не видно, если их не создавать искусственно.

Литье проволоочной заготовки через графитовые кристаллизаторы одновременно в несколько ниток является наглядным примером полного исключения горячей пластической обработки при производстве проволоки, прутков и труб. С точки зрения экономии энергии этот способ не бесспорен и эффективен лишь для металлов и сплавов, не требующих большого числа промежуточных отжигов в цикле холодной обработки. Если даже удастся непрерывным способом отливать заготовки малого поперечного сечения, например из свинцовистой латуни или нержавеющей аустенитной стали, то разумно применить непрерывную горячую прокатку, напрямую (без подогрева) совмещенную с литьем, и таким образом свести до минимума холодную пластическую деформацию. В противном случае расход энергии на нагрев металла при каждом отжиге окажется существенно выше, чем при традиционном способе изготовления проволоки из слитков большого сечения.

Большие энергозатраты на нагрев металла, например перед горячей деформационной обработкой – не единственный недостаток существующих технологий. Если проводится сортовая прокатка, то исходная температура определяется допустимым интервалом горячей обработки. Чаще всего нагрев соответствует верхней границе температурного интервала, а прокатка заканчивается на нижней границе. За исключением высокоскоростной прокатки катанки, потери тепла при многопроходной прокатке, особенно при большой длине раскатных полей, значительны и не позволяют снизить исходную температуру нагрева, что повышает угар металла. При замене обжимной и черновой прокатки деформацией в агрегатах интенсивного обжата температуру нагрева можно снизить до нижней границы температурного интервала, а дополнительное тепло получить за счет больших обжатий. Этого тепла после планетарной прокатки или радиальнойковки вполне хватает для осуществления горячей предчистовой и чистовой прокатки. При определенном уровне цен на энергоносители к технологиям интенсивного обжата придется обратиться, несмотря на радикальное изменение конфигурации и управления сортопрокатного цеха. В металлургии решение современных все углубляющихся проблем энергосбережения, к сожалению, не может быть сведено к работе по ночам по заниженным тарифам или к внедрению автоматиче-

ских систем управления искусственным освещением в производственных помещениях.

Существование металлургии без машиностроения бессмысленно, что вынуждает корректировать стратегию развития всего металлургического комплекса, опираясь на потребности производителей машин. Динамика современного изменения общего подхода к конструированию, изготовлению деталей и сборке машин, а также существенное снижение срока жизни производимого оборудования с одновременным ужесточением требований к его надежности вынуждают металлургов резко расширять сортаментные ряды своей продукции. Основной отличительной особенностью современного портфеля заказов машиностроительных заводов являются малые объемы поставки многих изделий металлургии, которые становятся невыгодно изготавливать на предприятиях, ориентированных на крупнотоннажное производство.

Таким образом, на изменение структуры металлургического производства неминуемо окажет влияние непрерывное расширение как марочного, так и типоразмерного сортаментов металлоизделий, а также повышение требований к качеству, особенно к машиностроительным заготовкам. Прогресс в механической обработке на автоматических обрабатывающих центрах, то есть комплексах оборудования с высокой степенью автоматизации, вынуждает металлургов уменьшать припуски на обработку и, следовательно, повышать размерную точность профилей, поковок, труб и т. п. Для повышения эксплуатационных свойств будущих изделий уже сейчас требуется при изготовлении машиностроительных заготовок управлять структурой и текстурой металла, что затруднительно. На старых предприятиях металлургии в основном управляли только формоизменением, не допуская разрушения и обеспечивая в среднем по объему требуемый уровень прочностных и пластических свойств металлоизделий.

Крупнотоннажное металлургическое производство, где техническое перевооружение наиболее трудно и дорого, еще долго будет характеризоваться узким сортаментом, который целесообразно сохранять далеко не для всех видов изделий. В листопрокатном, проволочном, рельсобалочном производствах при изготовлении труб общего применения и нефтегазового сортамента высокая производительность и умеренные требования к переналаживаемости оборудования сохраняются. Здесь всегда останутся актуальными авторизация и устранение зависимости производительности агрегатов, количества металло-

отходов и качества продукции от человеческого фактора. Оперативное расширение сортамента, освоение новых марок сплавов, рентабельное уменьшение объемов выпуска однотипной продукции, повышение качества за счет формирования особых физических и механических свойств при управлении структуро- и текстурообразованием возможны лишь с помощью многофункционального и быстроперенастраиваемого оборудования, пригодного для реализации новых (может быть, пока не известных) операций и приемов.

С одной стороны, располагая известными типами и конструкциями оборудования, невозможно принципиально изменить способы обработки и полностью отказаться от известных не оправдывающих себя технологических приемов. С другой стороны, если не придумана принципиально новая технология, то разработка нового оборудования направлена лишь на повышение производительности, повышение КПД, улучшение управляемости, снижение металлоемкости, но не на расширение технологических возможностей и реализацию принципиально иных ранее неизвестных схем обработки. В современных условиях заготовительные подразделения машиностроения и металлургические производства, занятые изготовлением металлопродукции с особыми физико-механическими свойствами, должны оснащаться оборудованием, проектируемым комплексно с разработкой новых технологий и систем управления. Таким образом, сегодня требуется изменение и структуры проектирования техники и технологий, в частности металлургического малотоннажного производства.

Существующая уже длительное время и сложившаяся как совершенная, на первый взгляд, организационная структура проектирования новых производственных объектов становится тормозом технического прогресса в металлургии. Одни ведущие организации занимаются технологией, опираясь на существующий парк машин, другие – разработкой новых конструкций оборудования, стараясь в полной мере обеспечить реализацию известных технологических приемов. Все, что в итоге получилось, передается в специализированные организации, занимающиеся автоматизацией, которые призваны реализовать предложенный технологами алгоритм управления порой на совершенно непригодном для автоматизации оборудовании (трудно и плохо управляемые приводы, отсутствие мест установки датчиков, люфты в трансмиссиях, неподходящая жесткость машин и др.). В конце процесса проектирования имеем практически прежние параметры оборудования и технологии. Отличие новой техники от старой

– только в установке современной, как правило, импортной, компьютерной техники управления, которая вынуждена контактировать с примитивной системой сбора информации.

Спектр социальных проблем металлургической отрасли, как и всей промышленности, чрезвычайно широк и во многих аспектах существенно влияет на технологическое развитие. Например, так называемый «человеческий фактор» оказывается определяющим в назначении рационального уровня автоматизации производства. Успешность неавтоматизированного производства зависит от квалификации персонала и от соблюдения им технологической дисциплины. Высокоавтоматизированное производство, с одной стороны, снижает требования к профессионализму основного персонала, занятого выпуском продукции, с другой – повышает требования для специалистов, занятых обслуживанием систем управления.

Во всех случаях развитие автоматизированного производства ведет к уменьшению количества рабочих мест и к усилению социальной напряженности на региональном уровне. Современные технические и программные средства автоматизации достаточны для полной замены человека в управлении технологическими процессами, в частности в металлургии. Такая замена всегда экономически целесообразна, поскольку исключает необходимость в обеспечении безопасных и безвредных условий работы персонала, упрощает и ускоряет проведение плановых регламентных работ на оборудовании, но создает трудно разрешимую проблему занятости. В итоге вне зависимости от технологической целесообразности приходится в каждом конкретном случае устанавливать рациональный уровень автоматизации производства, т. е. вместо автоматических систем управления использовать автоматизированные системы.

Уровень квалификации персонала занимает не последнее место в перечне социальных проблем металлургии и также должен учитываться при создании новой техники. Уже очевидно, что в ближайшее время крупные металлургические комплексы, претендующие на выпуск продукции с качеством, соответствующим стандартам наиболее технически развитых стран, и пригодные для быстрой переналадки в пределах достаточно широкого марочного и типоразмерного ассортиментов продукции, будут оснащаться нейронными системами управления, обучение которым потребует совершенно иного уровня технологической подготовки обслуживающего персонала.

Проблемы экологической безопасности также заставляют менять подходы к разработке новых металлургических технологий и к проектированию оборудования для их реализации. В общей металлургии рано или поздно придется отказаться от углеродистых восстановителей. Часть первородных рудных материалов придется заменять техногенными отходами. Безотходность производства – основной принцип проектирования новых технологий в металлургии, даже если такие технологии требуют больших энергетических затрат. В технологиях обработки давлением необходимо уменьшать количество промежуточных нагревов под пластическую и термическую обработку, полностью избавляться от химической очистки металлов от окалина и окислов.

Внешнеполитическая и внешнеэкономическая ситуация, в которой в настоящее время находится Россия, создает специфическую проблему в технологическом развитии как всей отечественной промышленности, так и металлургического производства, касающуюся национальной безопасности. Бесспорна экономическая эффективность международной кооперации в совершенствовании техники и технологии, в создании новых современных производств, в обеспечении качества металлопродукции на мировом уровне. Полное исключение зависимости от импорта в настоящее время, скорее всего, невозможно, но частичное самообеспечение деформирующим инструментом, смазочными материалами, программными продуктами, средствами автоматизации и автоматическим механообрабатывающим оборудованием актуально, несмотря на неминуемое снижение эффективности производства и качества металлопродукции. Позиция зарубежных фирм в политике втягивания наших производителей в технологическую и техническую зависимость легко объяснима с экономической точки зрения. Надежное импортное автоматизированное оборудование далеко не всегда соответствует современным и прогрессивным технологическим достижениям. Физически новое, но морально устаревшее оборудование всегда соответствует вполне определенной технологической парадигме, выбраться из которой становится тем труднее, чем больше средств затрачено на приобретение оборудования и систем его автоматического управления. Чем больше объемы производства предприятия, тем труднее и затратнее смена этой парадигмы [1].

1.2. Общие вопросы проектирования техпроцессов

Проект – это информационная модель достижения определенной производственной цели, представленная в виде совокупности документов.

Технический документ – это материальный объект, имеющий правовое значение и содержащий в зафиксированном виде информацию, оформленную в установленном порядке (ГОСТ 6.10.2-83).

Проект отвечает на 2 вопроса:

- какой должна быть еще не существующая система;
- как реализовать эту систему.

Цель проекта производственной системы заключается в отыскании наиболее рационального способа использования объективно ограниченных ресурсов для получения заданной продукции надлежащего качества.

Многообразие задач проекта классифицируют по разным признакам:

1) по уровням общности и последовательности:

- задачи социального планирования;
- технико-экономического планирования;
- технологического проектирования;
- конструкционного и рабочего проектирования;

2) по степени определенности при постановке задачи и принятии решения:

- задачи, решаемые в условиях неопределенности;
- задачи, решаемые в условиях частичной определенности;
- задачи, решаемые в условиях полной определенности;

3) по уровням проектируемого объекта:

- задача проектирования окружения объекта (внешнее проектирование);
- задача проектирования объекта в целом (макропроектирование);
- задача проектирования составных частей объекта (микропроектирование);

4) по функциям:

- задача проектирования технологии;
- задача проектирования оборудования;
- задача проектирования управления основным производством;
- задача проектирования материального обеспечения производства;

- задача проектирования строительства;
- 5) по характеру процедуры проектирования:
 - задачи вычислительные;
 - задачи оптимизационные;
 - задачи имитационные.

Задачи проектирования имеют принципиальные отличия от исследовательских задач, где для заданной системы находят закон, определяющий поведение системы (функциональную связь между «входами» и «выходами» системы). При проектировании ищут реализацию этих законов.

При социальном проектировании для принятия решения используются социальные критерии, а иногда политические, стратегические, экологические и другие, которым во всех случаях необходимо отдавать предпочтение.

При технико-экономическом планировании критерии для принятия решений на данном уровне имеют экономический характер. Предпочтение отдают тем вопросам, которые сопряжены с меньшими затратами.

Применительно к задаче обеспечения потребности в металлопродукции речь идет о размещении заказов на действующих предприятиях внутри страны или за рубежом, либо о создании нового строительства, расширении, реконструкции или техническом перевооружении действующих предприятий.

На уровне технологического проектирования определяется внутренняя структура и параметры производственной системы, необходимые и достаточные для достижения поставленной цели. К решению задачи привлекаются технологи по подготовке сырья, металлургии, специалисты по различным видам обработки металлов, электроприводу, автоматизации и т. д.

На следующем уровне проектирования проводится конструкторская проработка всех подсистем объекта разработчиками технического оборудования, электрики, электропривода, автоматики, вентиляции, сантехники, газопровода и др.

На последнем этапе проектирования разрабатывается рабочая документация.

Если четвертый и пятый этапы совмещены, то проектирование называется одностадийным и используется обычно при техническом перевооружении существующих предприятий. Двухстадийное про-

ектирование используется при создании новых производств или при широкой реконструкции старых.

В состав проекта, разрабатываемого при двухстадийном проектировании (согласно СН 202-81) входят следующие разделы:

- общая технологическая записка, содержащая необходимые данные для проектирования, краткую характеристику объекта и оценку оптимальности выбранного варианта, данные о проектной мощности объекта, номенклатуре и техническом уровне продукции, сырьевой базе, специализации и кооперировании, а также изложение и оценку прогрессивности и экономичности основных проектных решений, состав предприятия, очередности строительства, сведения по пусковым комплексам, результаты экономических расчетов, краткую характеристику района и площадки строительства, решение по генеральному плану и транспорту, инженерным сетям и коммуникациям, охране окружающей среды. При этом разрабатывается ситуационный план размещения предприятия и схема генерального плана;

- основные решения по технологии производства, расчетную производственную программу, обоснование решений по технологии производства, характеристику механизации и автоматизации техпроцессов и управления производством, сравнение этих решений с передовыми решениями отечественной и зарубежной практик, доказательства патентной чистоты проектных решений, предложения по организации контроля качества продукции, состав и оценку совершенства конструкций оборудования, характеристику коммуникаций, обоснование численности персонала, решения по АСУ ТП, тепло-, электро- и газоснабжению, охране окружающей среды, предположения по освоению проектных мощностей в нормативные сроки. В этом разделе выполняются:

- 1) схемы технологических процессов;
- 2) технологические компоновки по цехам и участкам;
- 3) принципиальные схемы АСУ, механизации и автоматизации, энергосбережения, трасс теплосетей, связи, сигнализации и т. д.;

- основные строительные решения, перечень применяемых типовых и повторно применяемых проектов, решения по объектам гражданской обороны;

- основные решения по организации строительства;
- сметная документация;
- рекомендации по выбору генподрядчика и субподрядных организаций.

Следует иметь в виду, что в проекте в соответствии с Инструкцией СН 202-81, отсутствуют материалы по технологической подготовке производства; он не учитывает изменения условий производства при наращивании объема от нуля до проектного уровня, а также при отклонении условий от проектных. В проекте нет требований к персоналу, способному обслуживать проектируемое производство, нет информации о полном объеме информационного и программного обеспечения.

Методы проектирования:

- нормативные;
- эвристические;
- математические;
- имитационное моделирование;
- автоматизированное проектирование.

Сущность нормативного метода в проектировании сводится к требованию неукоснительного соблюдения действующих норм и правил. Нормативные условия облегчают работу проектировщиков, избавляя их от необходимости обоснований.

Эвристическими называют многочисленные методы получения проектных решений при отсутствии достаточного математического описания, в которых здравому смыслу, интуиции и логике отводится не последняя роль.

Из математических методов в проектировании наиболее распространены методы оптимизации. Однако корректная оптимизация редко бывает достижима из-за наличия большого количества целевых функций и развитой системы ограничений.

В имитационном моделировании рассматриваются несколько конкурирующих вопросов и из них на основе экспериментальных оценок принимается преимущественный.

1.2.1. Организация и технология проектирования

На дирекцию строящегося или реконструирующегося предприятия возлагается функция заказчика. Из числа отраслевых технологических институтов назначают генерального проектировщика, из числа машиностроительных заводов-изготовителей оборудования – генерального поставщика, а из числа общественных организаций – генерального подрядчика.

Заказчик заключает с генеральными исполнителями серию генеральных договоров: на проектирование, на поставку оборудования, на проектирование строительно-монтажных работ.

Перед началом проектных работ генеральный проектировщик назначает главного инженера проекта (ГИП), который организует очередность работ по вверенному ему объекту и координирует деятельность подразделений института и привлеченных организаций.

Генпроектировщик начинает работу с разработки задания на проектирование, в котором указывается:

- проектная мощность объекта;
- номенклатура продукции;
- особые условия, которые должны учитываться при проектировании;
- сроки строительства;
- порядок ввода мощностей по очередям и пусковым комплексам;
- требования к разработке отдельных проектных решений;
- стадийность проектирования.

Приложениями к заданию на проектирование являются технологическое задание и техническое задание на проектирование нестандартного и несерийного оборудования, акт о выборе промплощадки и технические условия на строительно-монтажное проектирование.

В утвержденном технологическом задании на обработку металлов давлением должны быть освещены следующие основные моменты:

- полная технологическая схема производства;
- технология производства и требования к качеству продукции;
- технология подготовки металла к основным операциям ОМД, разгрузка, подготовка поверхности к нагреву и обработке, нагрев и т. д.;
- технология ОМД;
- технологии маркировки и складирования на межоперационных складах и складах готовой продукции;
- технология отделки металлопродукции;
- технология, методы и метрологические средства контроля качества, отбора проб, испытаний.

В техническое задание на проектирование оборудования входят:

- план расположения агрегатов, смазочных и гидравлических подвалов площадок в цехе;
- спецификация поставляемого оборудования и его техническая характеристика в обусловленном объеме;

- перечень и уровень контролируемых параметров, которые должны быть выдержаны при проектировании;
- принципы действия и порядок обслуживания проектируемого оборудования, порядок его монтажа и демонтажа;
- требования к инструментальной наладке и к ее ремонтпригодности;
- характеристика электрического и гидравлического оборудования, включая установленные мощности, скорости, способы и пределы ее регулирования, требования к электро- и гидроприводам;
- данные для определения размеров здания цеха, пролетов, мостовых конструкций для кранов;
- места подвода к оборудованию всех энергоносителей, характеристики отработанных энергоносителей, тепловыделения и других вредных выделений;
- строительное задание на фундаменты под оборудование, тоннели, кабельные каналы, подвалы и т. д.

Технические условия на строительное проектирование содержит данные двух типов:

- условия, определяемые по материалам СНиПов для конкретного района строительства и по результатам инженерно-геологических изысканий (температура, глубина промерзания почвы, снеговые и ветровые нагрузки, грунтовые воды, сейсмоактивность, характер грунтов и др.);
- сведения о типоразмерах конструкций, о наличии и качестве местных строительных материалов, о грузоподъемности и характеристиках имеющихся монтажных кранов, другого оборудования и т. д.

1.3. Технологическое проектирование

3.1.1. Исходные данные для технологического проектирования

Результатом социального и технико-экономического планирования является комплекс данных, имеющих относительно устойчивый характер, фиксированных в нормативных актах и в равной мере относящихся к различным проектам, а также комплекс данных имеющих частный характер, относящихся к конкретному проекту.

К данным первой группы относятся:

- временной лаг;

- социальный стандарт;
- основные направления в проектировании технологии.

Временной лаг – промежуток времени между принятием проектного решения и моментом реализации его экономической эффективности. Время лага в черной металлургии достигает 10–12 лет. В машиностроении этот диапазон довольно широкий – от 1 до 8 лет. С увеличением лага снижается точность прогноза. В то же время использование опережающего прогноза неизбежно удорожает объект, а отстающий прогноз приводит к старению проектных решений еще до реализации экономической эффективности.

Социальный стандарт составляют такие понятия:

- режим работы и квалификация трудящихся;
- уровень механизации труда и его оплаты;
- комплекс условий безопасной и безвредной работы;
- условия бытового обслуживания на производстве и в жилой зоне;
- защита окружающей среды;
- демографическая ситуация.

Основные направления в проектировании технологии выявляются в результате информационного поиска. На основе обзора способов получения заданной продукции и оборудования выявляются наиболее рациональные и оптимальные на основе методов оптимизации или экспертных оценок.

1.3.2. Элементы организации производства

Организация производства включает в себя:

- анализ характеристик готовой продукции и исходного металла;
- разработку функциональной и операционной структур производства продукции каждого вида;
- обзор способов достижения качества готовой продукции и оборудования;
- установление возможных схем технологического процесса для продукции каждого вида;
- анализ совместимости продукции различных видов с точки зрения возможности обработки на одном и том же оборудовании;
- установление производственной структуры и схемы движения металла.

Приступая к технологическому проектированию, необходимо определить объем работ по преобразованию исходного металла в готовую продукцию каждого вида.

Требования к продукции и заготовкам сводятся к следующему:

- назначение и область применения продукции;
- эксплуатационные характеристики и показатели качества продукции;
- требования к технологичности (оценка возможности достижения показателей качества продукции в условиях массового производства);
- требования к унификации и стандартизации (сведения об использовании стандартных заготовок, марок сплавов, материалов для покрытий);
- эстетические и эргономические требования;
- требования к приемке (размер партий, порядок их формирования, объем испытаний, их методы, правил отбора проб);
- требования к маркировке;
- требования к упаковке;
- требования к транспортировке;
- требования к хранению.

Преобразование исходного металла в продукцию, готовую к вывозу из цеха, – процесс многоэтапный. При этом металл проходит ряд контролируемых состояний. Последовательность этапов изготовления и контроля качества представляет собой функциональную структуру производства. Для большинства видов продукции эта структура может быть следующей:

- исходная заготовка;
- заготовка, подготовленная к пластической обработке;
- деформированный металл, не обладающий рядом свойств, оговоренных в задании;
- металлопродукция, прошедшая доводочные операции;
- продукция, прошедшая контроль качества и соответствующая условиям поставки;
- продукция, готовая к отгрузке;
- продукция, размещенная в транспортных средствах.

Задача разработки технологии состоит в том, чтобы наполнить блоки операционной структуры конкретным содержанием, зависящим от соотношения свойств на границах между фазами обработки.

Какие конкретные технологические процессы, операции, приемы могут быть использованы, какое необходимо использовать оборудо-

вание, какие тенденции намечаются в развитии техники и технологии, решается в процессе информационного поиска, который проводится в соответствии с ГОСТ 15.011–82. Цель информационного поиска – формирование представлений об известных и опубликованных в научно-технической литературе и патентных материалах вариантах по интересующей проблеме.

Регламент поиска – установление источников информации, их местонахождения, а также необходимой широты охвата материалов из различных стран мира и глубины во времени. Широту поиска определяет научно-технический уровень различных стран в рассматриваемой области. Помимо отечественной, изучается литература тех стран, которые в этой области находятся на передовых позициях. При этом следует учитывать, что копирование зарубежного опыта без учета нашего технического уровня и наших условий может приводить не к положительному эффекту, а к ущербу.

Временная глубина (ретроспектива) поиска должна быть достаточной для установления прогноза на срок, равный временному лагу. Как показывает практика, глубина может быть различной для разных объектов, но в среднем не менее чем двукратный размер лага.

Информационный поиск позволяет ответить на такие вопросы:

- в каком объеме требуется подготовка заготовок к пластической обработке;
- оборудование каких типов используется для производства готовой продукции из конкретной заготовки;
- как формируются свойства металлопродукции при пластической и термической обработке;
- как достигается качество поверхности при деформации, термообработке, зачистке, химической обработке, отделке, нанесении покрытий и т. д.;
- как осуществляется правка металлопродукции при отделке;
- как продукции придается транспортабельный вид;
- как осуществляется внутренняя транспортировка (вручную, механизированно, на спецмашинах);
- какие варианты упаковки продукции;
- на каких стадиях производства необходимо складирование продукции (полуфабриката), как оно осуществляется;
- как ведется маркировка продукции;
- какие способы и схемы отгрузки готовой продукции;

– где, в каком объеме и как организуется удаление и утилизация отходов металла, технологических жидкостей и т. д.

Источниками информации для проведения информационного поиска могут быть [1]:

- бюллетень Госкомизобретений «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки»;
- официальные бюллетени патентных ведомств зарубежных стран;
- описания отечественных и зарубежных изобретений;
- издания ВИНТИ, реферативные журналы «Металлургия», «Итоги науки и техники»;
- отраслевые информационные издания института Черметинформация;
- государственные и отраслевые стандарты;
- собрание трудов Гипромеза;
- периодические издания «Сталь», «Металлург», «Бюллетень ЦНИИЧМ», «Известия вузов. ЧМ и ЦМ», «Металлургия и горнорудная промышленность»; «Цветные металлы» и др.;
- научно-техническая литература;
- проектная и технологическая документация проектных организаций;
- прогнозы развития отраслей, прогнозы по отдельным научно-техническим проблемам, основные технические направления по проектированию объектов промышленности.

1.3.3. Установление возможных схем технологических процессов производства продукции отдельных видов

Схемой технологического процесса называется представление о роде оборудования и последовательности фаз обработки каждого вида из сортамента. Информационный поиск позволяет найти многообразие способов достижения результата обработки, каждому из которых (но не всегда) соответствует различное оборудование. Для некоторых процессов не удастся обнаружить эффективных решений. Некоторые технические решения устойчивы во времени, другие заметно изменяются, например, по мере развития автоматизации.

Число вариантов реализации каждого этапа технологии, открывающееся перед проектировщиком, зачастую достаточно велико. Для

принятия решений по выбору необходимо наличие критериев, которые позволяли бы производить анализ и выбор вариантов из множества возможных. Однако формальные критерии для оценки проектных решений на этом этапе пока не разработаны, и в лучшем случае у проектировщика есть лишь рекомендации из основных технических направлений в проектировании техпроцессов.

Особое внимание при формировании схем технологического процесса следует уделять операциям, технические решения по которым заметно изменяются во времени, а также тем, для которых удовлетворительные решения не обнаружены. Здесь возможны изобретения.

Если число видов продукции велико, необходимо провести анализ схем их производства в целях выявления фаз одинакового функционального назначения. При этом могут быть отсеяны некоторые варианты схем производства отдельных видов продукции, если они требуют организации большого числа специализированных фаз обработки. С другой стороны, могут обнаружиться фазы, незначительно отличающиеся по объему обработки и результатам, и, следовательно, можно рассмотреть варианты совмещения либо разделения операций.

На этом этапе проектировщику несколько раз приходится принимать принципиальные решения, определяющие эффективность будущего производства:

- при выборе способов обработки металла;
- при выборе оборудования;
- при формировании возможных схем производства отдельных видов продукции;
- при построении производственной структуры цеха.

1.4. Перспективные направления развития заготовительного производства

1.4.1. Производство блюмов и слэбов

В традиционной технологии производства проката крупные заготовки – блюмы и слэбы – являются полупродуктом, предназначенным для дальнейшей обработки. Заготовки квадратного сечения или близкого к нему, получаемые на блюмингах размерами от 450×450 мм до 140×140 мм, называются блюмами. Далее они прокатываются на крупносортовых или непрерывных заготовочных станах. В отдель-

ных случаях на блюмингах получают подкаты для крупных балок и других фасонных профилей.

Заготовки прямоугольного сечения с отклонением ширины к высоте, равным 3–12, называются слябами, получаемыми на слябингах, а иногда и на блюмингах. Сляб является заготовкой для листовой прокатки, а в некоторых случаях играет роль кузнечных заготовок. Наибольшая толщина слябов достигает 350 мм, а ширина – 2300 мм. Масса блюмов может быть от 10 до 25 тонн, а масса слябов – от 40 до 45 тонн.

В зависимости от сортамента блюмов, производительности, схемы прокатки и расположения оборудования блюминги подразделяются на двух- и многовалковые (чаще одноклетьевые), реверсивные и не-реверсивные. Наиболее распространены одноклетьевые двухвалковые реверсивные блюминги. Основным направлением в развитии блюмингов является повышение их производительности за счет увеличения массы слитков и поперечного сечения проката, а также за счет одновременной прокатки двух или даже трех слитков.

Непрерывные заготовочные станы (НЗС) используются для проката блюмов сечением от 250×250 мм до 450×450 мм в квадратные заготовки размерами от 40×40 мм до 250×250 мм, которые применяют в качестве исходной заготовки для прокатки сортовой стали и катанки. Кроме квадратных прокатывают круглые заготовки для прокатки труб и шаров. НЗС обычно состоит из двух групп по шесть клеток в каждой. Эти станы устанавливают непосредственно за блюмингом. Дальнейшее развитие НЗС, связанное с увеличением их производительности, заключается в устранении поверхностных дефектов и в расширении сортамента заготовок (трубные, шаровые, заготовки для деталепрокатки). Характерными особенностями НЗС являются чередование клеток и индивидуальный регулируемый привод клеток.

1.4.2. Производство непрерывнолитых заготовок

Слитки наполнительного литья, прокатываемые на блюмингах и слябингах, имеют крупнозеренную структуру и значительную химическую неоднородность как по сечению, так и по высоте слитка. Из-за дефектных прибыльной и донной частей слитка выход годного остается достаточно низким.

Непрерывное литье заготовок (НЛЗ) является прогрессивным и высокоэффективным процессом. Преимущества НЛЗ состоит не только в значительном сокращении производственного цикла получения готового металла и капитальных затрат, но и в значительном повышении качества заготовок за счет однородности их строения и снижения расхода металла. Выход годных слябов при их производстве методом НЛЗ примерно на 20 % выше для углеродистых спокойных сталей и на 10–12 % для кипящих сталей по сравнению с прокаткой слитков на слябинге. При НЛЗ в режиме «плавка на плавку» выход годного повышается до 90 % и более за счет сокращения отходов металла, связанных с остановками машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Разливать на МНЛЗ при соответствующем подборе условий процесса кристаллизации можно стали всех сортов и марок, начиная от низкоуглеродистых и кончая высокоуглеродистыми сталями. Возможна непрерывная разливка большинства цветных металлов и специальных сплавов.

МНЛЗ подразделяются на следующие типы:

- вертикальные машины с поперечной разрезкой слитка в вертикальном положении;
- вертикальные машины с изгибом литого металла и разрезкой слитка в горизонтальном положении;
- радиальные машины с постоянным радиусом кривизны зоны вторичной кристаллизации;
- горизонтальные машины с одно- и двухсторонним вытягиванием слитка.

Расплав металла из разливочного ковша поступает в промежуточный ковш, нагретый предварительно до температуры $(0,7–0,8) T_{пл}$. Из промежуточного ковша расплав металла с перегревом в 30–70 °С поступает в кристаллизатор. В кристаллизаторе с медными стенками происходит быстрое охлаждение жидкого металла и образование твердой корки. Кристаллизатор постоянно охлаждается циркулирующей под давлением водой, при этом он совершает возвратно-поступательные движения вдоль оси литья с амплитудой 15–30 мм, чтобы металл не приваривался к стенкам кристаллизатора.

Застывающий в кристаллизаторе металл сцепляется с затравкой и продвигается вниз тянущими роликами. В зоне вторичного охлаждения заготовка охлаждается водой до полного затвердевания по всему сечению, и после этого (в машинах вертикального типа) разрезается

на мерные длины и кантователем передается на транспортировочный рольганг.

Высота МНЛЗ вертикального типа для разливки стали зависит от сечения слитка, химического состава стали, скорости вытягивания, отрезаемой длины и достигает 40–50 м, что требует больших затрат на строительство и эксплуатацию. Вертикальные машины наиболее универсальны. Для литья заготовок большой толщины они являются наиболее простыми и удобными.

Особенность МНЛЗ вертикального типа с изгибом заключается в том, что на выходе из тянущих роликов передний конец изгибается до горизонтального положения (при помощи направляющих роликов), правится, разрезается на мерные длины в горизонтальном положении. Это позволяет уменьшить высоту машины и упростить весь процесс разливки, повысить его производительность. Однако такие машины требуют большой площади и мощного оборудования для изгиба заготовки.

В машинах радиального типа кристаллизатор и направляющие устройства изогнуты по дуге постоянного радиуса. Заготовка с таких машин не уступает по качеству заготовкам с МНЛЗ вертикального типа. При этом высота радиальных МНЛЗ значительно меньше, а скорость разливки может достигать 2 м/мин. Однако эти МНЛЗ также требуют больших производственных площадей и мощного разгибающего оборудования. При выпрямлении литых заготовок несколько искажается их профиль и возможно появление трещин.

МНЛЗ часто имеют несколько ручьев (до 8).

Определенным достижением в области непрерывного литья можно считать появление горизонтальных МНЛЗ. Они имеют малую высоту (не более 8 м) и значительно снижают капитальные затраты. Для стабильности процесса вытягивания металла из кристаллизатора применяется метод получения двух слитков из одного кристаллизатора. Жидкий металл, попадая в кристаллизатор, имеет два фронта кристаллизации.

Перспективным способом повышения качества литого металла, получаемого на МНЛЗ, является электромагнитное перемешивание металла в процессе кристаллизации. Это приводит к более однородной структуре металла по объему и позволяет полностью исключить ликвацию.

На МНЛЗ получают слябы сечением (120–250)×(900–1800) мм, и сортовые заготовки сечением до 280×280 мм. Разливаются также и

меньшие по сечению заготовки. Скорость разливки 0,7–2,0 м/мин. Производительность МНЛЗ зависит от скорости разливки, числа ручьев, сечений разливаемых заготовок.

Проблема объединения МНЛЗ и прокатных станов в единый комплекс является основной в направлении повышения эффективности всего металлургического производства. При решении этой проблемы, при прокатке будет использоваться внутреннее тепло литых заготовок, уменьшаться угар металла, потери металла на резке.

Однако реализация комплексного использования МНЛЗ с прокатными станами весьма трудна в следствие разности скоростей литья и прокатки. Полное совмещение литья и прокатки возможно лишь при увеличении скорости вытягивания литой заготовки из кристаллизатора, а также при использовании специальных агрегатов с входной скоростью, равной скорости литья, и с большим коэффициентом вытяжки.

Совмещение непрерывного литья стальных заготовок с прокаткой возможно при многоручьевом литье с несколькими кристаллизаторами. При этом заготовки из разных ручьев должны поочередно задаваться в прокатный стан. Опыт показывает, что при разной ширине готовых листов наиболее технологичным и экономически целесообразным является применение кристаллизаторов с быстроменяющимися размерами.

Важным направлением в развитии техники и технологии непрерывного литья являются методы получения тонких слябов обжатием слябов с еще жидкой центральной частью.

На традиционных станах горячей прокатки в основном применяют слябы толщиной 200–250 мм, при этом в черновой группе клетей требуется такая деформация, которая обеспечит подачу проката толщиной 35–45 мм в чистовую группу клетей. Если этот подкат заменить непрерывнолитым, то пропускная способность обычной МНЛЗ должна соответствовать пропускной способности МНЛЗ литья тонких слябов. Для производства слябов малой толщины требуется изменить форму кристаллизатора в верхней части. Кристаллизатор должен иметь в верхней части форму воротника, а в зоне узких граней – цилиндра, что позволит изменять ширину сляба во время разливки. Такой процесс был разработан компанией «Шлеман – Земаг» и получил название CSP (Compact Strip Production).

Для процесса CSP характерно:

- разливка тонкого сляба толщиной 40–70 мм;

- после МНЛЗ происходит разрезка на мерные длины;
- сляб подается в печь со скоростью разливки, в которой выравнивается температура по толщине сляба, и ускоряется до скорости подачи в прокатную клеть.

На машинах CSP, находящихся в эксплуатации производятся слябы сечением (45–70)×(890–1680) мм. Максимальная производительность одного ручья МНЛЗ может составлять 1,3 млн. т/год.

1.5. Технологии и машины интенсивных обжатий сортовых заготовок

В современной технологии сортопрокатного производства большое внимание уделяется созданию и внедрению машин для деформации сортовых заготовок с высокими обжатиями. Обжимные машины выполняют функцию черновых клетей на сортавых и проволочных станах, а также применяются в составе литейно-прокатных агрегатов. При установке этих машин в линии прокатных станов сокращаются производственные площади, снижаются расходы металла и энергозатраты, повышается качество выпускаемой продукции.

Машины для обжатия сортовых заготовок с высокими вытяжками за проход могут быть разделены на две основные группы, характеризующиеся особенностями технологии. Машины первой группы обеспечивают дискретное обжатие заготовки, а машины второй группы – непрерывное.

К машинам первой группы относятся:

- радиально- и колебательно-ковочные машины;
- эксцентрикковые и маятниковые клетки;
- планетарные клетки продольной прокатки.

К машинам второй группы относятся:

- стационарные и вращающиеся клетки винтовой прокатки;
- компактные обжимные группы и блоки продольной прокатки.

1.5.1. Радиально-ковочные машины (РКМ)

Наибольшее распространение получили радиально-ковочные машины (РКМ) фирмы GFM. Для обжатия круглых заготовок используются РКМ фирмы «Sack». Отечественные РКМ выпускаются Рязанским КПО.

В литейно-прокатных агрегатах применяются четырех-, шести- и восьмибойковые РКМ. При четырехбойковой схеме обжатия осуществляются поочередно парами бойков и металл имеет возможность свободно уширяться. Такие РКМ целесообразно применять для обжатия заготовок из рядовых и низкоуглеродистых сталей.

В шестибойковой машине обеспечивается лучшая проработка центральной зоны заготовки при ограничении свободного уширения, что позволяет обрабатывать труднодеформируемые сплавы со значительными обжатиями за проход.

Наиболее технологичными являются восьмибойковые машины, в которых обеспечивается всесторонняя деформация заготовки двумя комплектами из четырех бойков. При этом обеспечивается мягкая схема напряженного состояния, а за счет перекрытия бойков исключается возможность образования заусенцев.

В состав РКМ, как правило, входят подающие ролики, установка гидросбива окалины и собственно ковочный блок бойков.

В зависимости от требуемой вытяжки ковочные машины выпускаются в одно- и двухсекционном исполнении. В последнем случае применяется жесткая связь между приводами обеих секций, обеспечивающая синхронность их работы.

РКМ фирмы GFM выпускаются серийно дляковки заготовок диаметром от 60 до 150 мм с вытяжкой за проход до 3,5 при частоте хода бойков от 400 до 900 мин⁻¹. Скорость продвижения кованой заготовки достигает 20 м/мин.

Во ВНИИМетМаше была создана РКМ для обжатия сортовой заготовки в потоке горизонтальной МНЛЗ, производящей непрерывнолитые круглые слитки диаметром 130 мм. Скорость подачи литой заготовки равна 2 м/мин.

РКМ обычно применяются в составе совмещенных агрегатов литья-прокатки. Фирма GFM выпускает целую серию различных агрегатов, в состав которых в зависимости от сортамента и требуемой степени деформации включаются одно- или двухсекционные РКМ и непрерывные группы прокатных клетей. В качестве удачного примера типа агрегата можно рассмотреть ковочно-прокатный агрегат, установленный на одном из заводов "Roblin Steel" в США. В состав агрегата входят:

- нагревательная печь;
- установка гидросбива окалины;
- двухсекционная РКМ;

- непрерывная семиклетьевая прокатная группа с консольными валками;
- летучие ножницы;
- реечный холодильник;
- ножницы холодной резки проката.

Производительность ковочно-прокатного агрегата достигает 90 тыс. т в год. Заготовка – блюм 125×125 мм, прокат – круг диаметром 70–28 мм.

Как показывает практика, при вытяжке 3,5 на РКМ достигается не только уплотнение середины заготовки, но и мелкозернистая структура по всему поперечному сечению заготовки. Усадочная пористость ликвидируется уже в первой трети зоны обжатия. После одного прохода заготовка имеет механические свойства, эквивалентные свойствам проката после вытяжки, равной 8–10. По вытяжке двухсекционная РКМ заменяет прокатную группу из десяти клетей. Интенсивная деформация вызывает повышение температуры металла, что позволяет снизить необходимую температуру нагрева заготовки в печи.

В качестве недостатковковки на РКМ следует рассматривать следующие:

- значительный износ бойков;
- значительные динамические нагрузки, растущие при увеличении частоты;
- необходимость вспомогательных задающих устройств;
- при обработке мерных заготовок необходимы дополнительные механизмы транспортировки для доковки заднего конца;
- сравнительно малая скорость подачи заготовки.

1.5.2. Колебательно-ковочные машины (ККМ) и станы шаговой прокатки

Наибольшее распространение получила машина фирмы "Kocks". В ККМ заготовка деформируется четырьмя бойками с профилированной рабочей поверхностью. Траектория движения бойков, работающих попарно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, обеспечивается кинематикой привода. Схема работы этой ККМ приведена на рис. 1.1.

Цикл обжатия состоит из четырех стадий:

- начальное обжатие;
- полное обжатие;
- калибрование;
- холостой ход и подача.

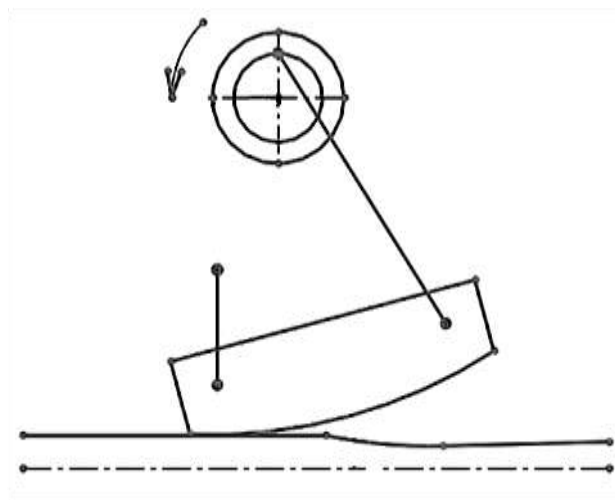


Рис. 1.1. Схема работы колебательно-ковочной машины

Машины предназначены дляковки квадратных заготовок от 450 до 145 мм с вытяжками за проход от 4 до 8 и со скоростью выхода кованой полосы из зоны обжатия 0,25–0,45 м/с.

Подобные машины могут применяться на однократных мелко-сортных и проволочных станах вместо чистовых клетей, на литейно-прокатных агрегатах с многоручьевой МНЛЗ после промежуточной нагревательной печи, а также в качестве заготовочного стана средней производительности.

Фирма "Kocks" в Бремене установила на проволочном стане колебательно-ковочную машину своей конструкции. В составе стана имеется нагревательная печь для заготовок 180x180 мм, ковочная машина и два непрерывных блока трехвалковых клетей. Аналогичный стан работает на фирме "Atlantic Steel" в США. Ковочная машина располагается параллельно непрерывному прокатному стану, и между ними помещена компенсационная петля. Стан получает катанку диаметром 14–5,5 мм. Длина стана достигает 100 м, а ширина – 30 м.

ККМ фирмы "Kocks" имеют достаточно высокую производительность для установки их на ЛПА (литейно-прокатный агрегат), однако, они имеют сложную и динамично нагружаемую конструкцию, что затрудняет их эксплуатацию.

Машина прокатки-ковки конструкции ЧПИ (Челябинский политехнический институт) (рис. 1.2) содержит два бойка-валка, оси которых находятся в плоскости, перпендикулярной оси прокатки.

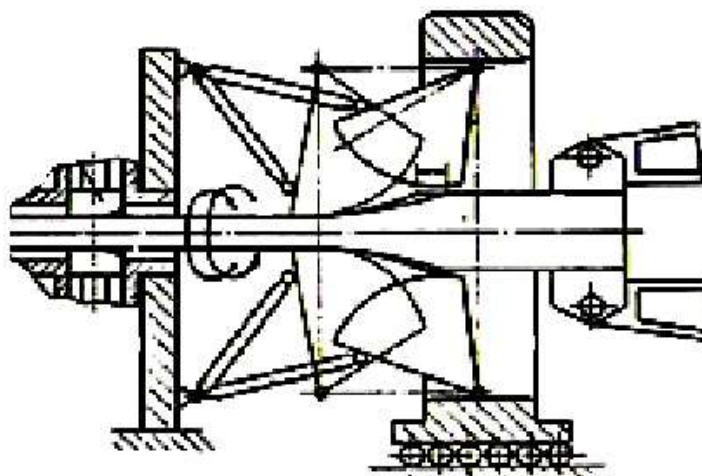


Рис. 1.2. Машина прокатки-ковки конструкции ЧПИ

Бойки совершают одновременно возвратно-поступательные и качательные движения. При ходе бойков в направлении подачи осуществляется обжатие заготовки, при ходе назад бойки без обжатия обкатывают заготовку, а затем отрываются от ее поверхности. При этом заготовка кантуется и подается манипулятором. Машина используется для обжатия труднодеформируемых сталей и сплавов с вытяжкой за проход 6–8. Заготовки могут иметь квадратное, круглое, многоугольное сечения. Сечение готовой продукции может также иметь различную форму, которая определяется количеством и профилировкой бойков.

В процессе прокатки-ковки осуществляется многостороннее обжатие металла одновременно работающими валками-бойками, что усложняет настройку процесса, так как при переполнении очага деформации неизбежно затекание металла в промежутки между бойками и, как следствие, образование закатов. Для обеспечения четкой работы машины в заданном режиме необходима сложная система синхронизации и высокопроизводительный гидравлический привод. Кинематика машины не обеспечивает самостоятельного захвата и выдачи заготовки. Неизбежный в этом случае недокат приводит к повышенному расходу металла.

1.5.3. Эксцентрикковые клетки

Фирмой "Schloemann" разработаны клетки эксцентрикового типа, предназначенные для обжата сортовой заготовки с высокой вытяжкой. В качестве рабочего инструмента применяются калиброванные валки, которые попарно со смещением по фазе на 180° обжимают заготовку. Поворот эксцентриков осуществляется через конические передачи, установленные в станине, или через кривошипные передачи.

Фирмой разработаны эксцентриковые клетки нескольких типоразмеров, в том числе для обжата заготовок сечением 230×230 мм с вытяжкой до 10 и скоростью выхода заготовки 0,6 м/с.

1.5.4. Маятниковые клетки

Клетки конструкции фирмы "Demag" предназначены для деформации непрерывнолитой заготовки, получаемой на литейно-прокатных агрегатах. Слитки сечением 355×255 мм при выходе из МНЛЗ поступают в рабочую клетку Дуо, в которой прокатываются до сечения 250×250 мм, а затем в маятниковую клетку. Рабочие и опорные валки расположены на балансирах, который непосредственно соединен с первым эксцентриком, а через шатун – с другим эксцентриком. При вращении двух эксцентриков рабочий валок описывает заданную траекторию.

При ходе вперед осуществляется деформация металла, при этом эксцентрики перемещают балансиры таким образом, что валок на выходе из зоны деформации движется практически параллельно оси прокатки. Это обеспечивает проглаживание металла. Рабочий и опорный валки – не приводные.

Две маятниковые системы работают синхронно, обеспечивая двухстороннее обжатие металла. Для всестороннего обжата в клетку устанавливается до четырех маятниковых систем, смещенных по фазе относительно друг друга на 180° .

В таких клетках обжимаются заготовки сечением до 250×250 мм с вытяжкой до 12,5. Скорость выхода проката до 25 м/мин.

Для всех конструкций маятниковых клеток свойственны следующие недостатки:

- значительная динамическая нагрузка на привод во время обжата;

- поверхность обжатой заготовки получается волнистой;
- для подачи металла в клеть требуется задающее устройство.

1.5.5. Планетарные клетки продольной прокатки

Планетарная продольная сортовая прокатка обеспечивает четырехстороннее обжатие заготовки рабочими валками, поочередно входящими в очаг деформации.

Сортовая планетарная клеть конструкции ВНИИМетМаш (рис. 1.3) работает на проволочном ЛПА завода «Электросталь» и производит катанку из высоколегированной стали и сплавов.

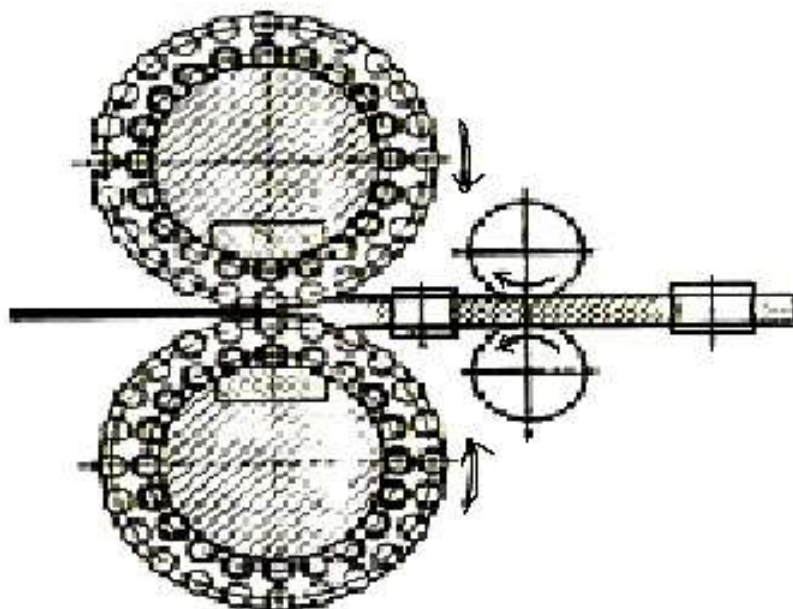


Рис. 1.3. Сортовая планетарная клеть конструкции ВНИИМетМаш

Сечение отливаемой на радиальной МНЛЗ заготовки равно 80×60 мм. Скорость разливки составляет 1,5–3,5 м/мин. В состав ЛПА кроме МНЛЗ входят:

- установка плазменной резки литой заготовки;
- проходные индукционные установки стабилизации температуры;
- четырехвалковая планетарная клеть с обжимающим задающим устройством, сечение заготовки после клетки – квадрат от 11×11 мм до 14×14 мм;
- шесть непрерывных клеток для прокатки катанки диаметром от 8 до 11 мм, масса бунта достигает 1000 кг, скорость прокатки составляет от 0,9 до 4,8 м/с.

Основным преимуществом сортовой планетарной прокатки перед другими способами интенсивного обжatia является возможность сверхвысоких обжатий за один проход с вытяжкой до 40. Планетарная прокатка характеризуется высокой дробностью деформации, при которой усилие на валках малого диаметра сравнительно не велико, что позволяет прокатывать стали и сплавы с высоким сопротивлением деформации.

Повышение температуры металла за счет интенсивного обжatia позволяет начинать деформацию при более низких температурах, что снижает расход энергии на нагрев, сокращает угар металла и обезуглероживание поверхности. Малый диаметр валков дает малое уширение и, следовательно, большую вытяжку.

Однако для планетарной клетки требуется дополнительное задающее устройство. Практически невозможно осуществлять докатку заднего конца полосы. В процессе прокатки на планетарном стане возникают усилия, направленные против хода металла, что затрудняет совмещение непрерывного литья и прокатки.

1.5.6. Клетки винтовой прокатки

Способ поперечно-винтовой прокатки, ранее применявшийся в основном для производства труб и круглых профилей переменного сечения, стал использоваться в настоящее время для деформации сортовой заготовки с большими обжатиями за проход.

Для достижения больших обжатий и получения заготовки с плотной сердцевиной деформация металла, как правило, осуществляется в трех валках, установленных под углом раскатки к оси заготовки и развернутых к ней под углом подачи. При этом угол подачи больше, чем при прошивке труб.

Для поперечно-винтовой прокатки применяются два типа клеток: двухопорные и консольные валки. Клетки с двухопорными валками разработаны на ПО «ЭлектростальТяжМаш». Они являются трехвалковыми и имеют станину разъемного типа. В расточках станины помещены барабаны, в каждом из которых на подшипниках установлены бочкообразные валки. В станине также установлены механизмы регулировки раствора валков, перемещающие барабаны в осевом направлении, и механизмы регулировки угла подачи, поворачивающие барабаны вокруг оси. Привод валков индивидуальный от трех элек-

тродвигателей постоянного тока через редуктор и универсальные шпиндели.

На входной стороне клетки установлены пневматический толкатель и задающие ролики, а на выходной стороне – V-образные желоба и выдающие ролики.

Вращающиеся клетки винтовой прокатки в основном выполняются с тремя валками. Наиболее известна конструкция клеток фирмы «Siemag», где три конических валка, расположенные под углом раската 45° к оси прокатки и под углом 120° друг к другу, вращаются вокруг своей оси и вместе с клетью в планетарном движении вращаются относительно проката, образуя конусообразную зону деформации вокруг неподвижной заготовки. Вследствие разворота осей валков относительно оси проката на угол подачи осевая составляющая окружной скорости валков способствует продольному перемещению проката вдоль зоны деформации без дополнительных механизмов подачи.

Для предотвращения скручивания проката в очаге деформации угол между направлением движения металла и осью валка так согласован с углом конусности валков, что отношение диаметра валка и проката остается постоянным по всей длине очага деформации. Клеть приводится от двух электродвигателей постоянного тока, передающих вращение валкам и корпусу.

Данная клеть имеет следующие характеристики:

- диаметр заготовки может достигать 120 мм;
- диаметр проката не менее 38 мм;
- вытяжка до 6,8;
- скорость прокатки до 0,5 м/с;
- диаметр валков – 380 мм.

Аналогичное оборудование разрабатывает и поставляет фирма «Mannesmann Demag». Применение таких клеток целесообразно для замены черновой группы обычных клеток продольной прокатки в составе непрерывных мелкосортных и проволочных станов, выпуска круглых или квадратных заготовок, замены обжимных клеток Трио при модернизации существующих линейных сортовых станов.

Применение различных конструкций клеток винтовой прокатки позволяет:

- обеспечить режим прокатки с коэффициентом вытяжки до 15 за проход;

- при необходимости увеличить входное сечение заготовки без снижения скорости ее входа в стан;
- осуществлять деформацию непрерывно, без ударных нагрузок в процессе прокатки с незначительным уровнем шума;
- осуществлять самоподачу проката при отсутствии специальных подающих механизмов;
- эффективно уплотнять сердцевину заготовки в процессе деформации, что позволяет обрабатывать непрерывнолитые заготовки;
- разогревать металл за счет интенсивной деформации.

Вращающиеся клетки конструктивно сложнее, чем стационарные, однако могут успешно применяться в агрегатах совместного литья-деформации.

1.5.7. Малогабаритные обжимные группы клеток

Наиболее распространенной компактной группой обжимных клеток является группа клеток фирмы «Morgan» (США). В ее основу положен принцип продольной прокатки с увеличенными обжатиями за счет принудительной задачи проката из одной клетки в другую путем подпора.

Малогабаритные обжимные группы клеток характеризуются уменьшенным основным габаритом группы – размером вдоль направления прокатки. Это достигается путем сокращения технологически необходимого числа рабочих клеток за счет увеличения обжатия в каждой из них. Это решение не существенно при задаче проката с подпором и сохранения устойчивости полосы в межклетевых промежутках путем его уменьшения, а также при наличии специальной системы регулирования и поддержания скоростей в клетях. Таким образом, уменьшение габарита обжимных групп клеток достигается как за счет снижения количества клеток в группе, так и путем сокращения межклетевых расстояний.

Малогабаритная обжимная группа клеток фирмы «Morgan» состоит из четырех чередующихся горизонтальных и вертикальных клеток и предназначена для однократной прокатки заготовки 178×178 мм в подкат сечением 76×76 мм с общей вытяжкой 5,5.

Прокатка в первой клетке группы осуществляется при естественной задаче заготовки с учетом угла захвата до 21° при обжатии около 0,11. Прокатка в последующих клетях происходит с принудительной

задачей заготовки предыдущими клетями при углах захвата до 45° и обжатии до 0,48.

Диаметр рабочих валков всех клетей составляет 508 мм, а длина бочки – 280 мм. Прокатка проводится на гладкой бочке или используется один ящичный калибр. После захвата полосы валками очередной клетки система управления приводами автоматически перестраивает соотношение скоростей прокатки в клетях, исключая подпор и обеспечивая в дальнейшем прокатку с незначительным межклетевым натяжением. Датчики установлены в проемах станин и воспринимают горизонтальные усилия подпора и натяжения.

Валки с подушками всех четырех клетей установлены в общей станине, в которой стойки, воспринимающие усилия прокатки, выполнены общими для рядом расположенных клетей. Таким образом, в группе практически нет межклетевых промежутков и расстояние между осями соседних клетей равно примерно 1 м.

Проводковые брусья с валковой арматурой крепятся к подушкам и не выходят за их габариты. При смене валков подушки с валками выдвигаются из окон станины в сторону перевалки на специальных тележках. Тележки выдвигаются с помощью гидроцилиндров по отдельности или вместе за 10–15 минут.

Привод всех клетей индивидуальный от электродвигателей постоянного тока. Привод вертикальных клетей выполняется верхним через комбинированный редуктор и телескопические шпиндели. Привод горизонтальных клетей выполняется по обычной схеме через шестеренную клеть и шпиндели.

Четырехклетевая малогабаритная обжимная группа клетей фирмы «Morgan» имеет габариты по осям крайних клетей 3 м и по деформации заменяет группу из шести обычных клетей, имеющую длину 18 м.

К недостаткам компактных групп клетей любой конструкции можно отнести трудность извлечения полос при аварийных ситуациях, захолаживание кромки проката при прокатке на гладкой бочке и повышенный износ проводок. Однако высокая вытяжная способность, сравнительная простота конструкции и обслуживания, относительно малая металлоемкость делают компактные группы клетей более перспективными, чем планетарные станы и прокатно-ковочные машины на новых и модернизированных станах.

В современных обжимных группах клетей используются так называемые бесстанинные клетки конструкции фирм «Sket» (Германия),

«Danieli» (Италия) и «Morgardshammer» (Швеция). В бесстанинной клети повышенной жесткости силовой поток имеет малую протяженность, замыкаясь на подушках через соединительные болты. Зазор между валками в этой клети регулируется синхронным перемещением подушек при вращении установочного механизма соединительных винтов, имеющих на концах резьбу противоположных направлений. Винты вращаются в гайках, опирающихся через промежуточные сферические втулки на подушки.

Увеличение обжатий в компактных блоках достигается также за счет установки перед блоком трайбаппарата, обеспечивающего принудительный захват полосы. Угол захвата при этом близок к углу захвата при стационарном режиме прокатки.

Обслуживание блоков и групп клеток существенно облегчается при использовании модульного принципа конструирования валковых узлов. В состав валкового модуля входят валки, подшипники и опоры, удерживающие валки в рабочем положении и воспринимающие на себя усилие прокатки. Элементы для фиксации клетки в линии стана и механизмы для регулирования зазора между валками, имеющие малую жесткость, не входят в силовой контур, что существенно увеличивает жесткость клетки.

Валковый модуль собирается и настраивается в мастерской и полностью готовый к работе устанавливается в линию стана.

Фирмой «Danieli» разработано два варианта установки модулей:

- модуль, устанавливается на фиксированную платформу, укрепленную в фундаменте линии стана;
- модуль в мастерской устанавливается на собственную платформу, в линию стана монтируется в собранном виде.

При конструировании компактных обжимных блоков весьма перспективно внедрение гидравлического привода рабочих валков, что позволит устранить громоздкие электромеханические приводы клеток. На базе известных конструкций бесстанинных клеток создается компактный обжимной блок, масса которого на 80 % меньше, чем у аналогичных блоков и электромеханическим приводом.

Для валков используется гидромоторы роликколопастного типа, монтируемые непосредственно на подушках соосно с рабочими валками. Роторы моторов жесткими муфтами соединяются с приводными шейками рабочих валков. Каждый валок приводится во вращение двумя моторами. Подушки валков зафиксированы колоннами, а между смежными подушками установлен регулируемый подпятник,

управляющий величиной межвалкового зазора. Подушки прижимаются к подпятнику гидроцилиндрами, параллельно подключаемыми к гидросистеме линии гидромоторов.

В станине блока в каждой кассете имеются три позиции гидропривода с быстроразъемными гидромоторами, что соответствует углам кантовки 0, 45 и 90°. Гидроцилиндры прижима подушек валков к подпятникам создают предварительное напряжение клетки и повышают ее жесткость. Параллельное соединение гидроцилиндров с моторами вводит пропорциональную связь между усилием нажима и моментом прокатки. При холостом ходе привода напряжение с клетки снимается. Подбором размеров гидроцилиндров и настройкой редукционного клапана в напорной линии легко обеспечивается регулирование предварительного напряжения клетки или осадка переднего конца полосы в момент захвата. Такой режим прокатки дает возможность существенно повысить вытяжку в группе обжимных клеток.

В нашей стране и за рубежом наибольшее распространение в силу конструкционных и технологических преимуществ получили стационарные клетки винтовой прокатки с вращением заготовки, вращающиеся клетки винтовой прокатки, малогабаритные обжимные группы клеток продольной прокатки, сортовые планетарные клетки и радиально-обжимные машины.

Эксцентриковые и маятниковые клетки, а также колебательно-ковочные машины не получили дальнейшего развития, что определяется в основном их конструкционными недостатками.

Клетки винтовой прокатки обеспечивают высокую вытяжку за проход, у них отсутствуют динамические нагрузки, они не требуют задающих устройств, хорошо прорабатывают структуру металла по сечению. Применение стационарных клеток ограничивает возможную длину заготовки, требует увеличения протяженности агрегата, исключает возможность непосредственного совмещения с МНЛЗ.

Вращающиеся клетки винтовой прокатки можно использовать на мелкосортных и проволочных станах и совмещенных ЛПА вместо реверсивных клеток или клеток Трио, а также черновых групп клеток при общей вытяжке 5–6, сечениях исходной заготовки не более 150–160 мм и скорости входа заготовки в стан не более 0,15–0,18 м/с.

Малогабаритные обжимные группы клеток обеспечивают высокую вытяжку, возможность прокатки заготовок с высокой входной скоростью (до 0,6 м/с) и непрерывнолитых заготовок. Они компактны, имеют простую конструкцию и относительно малую металлоемкость.

Однако нежелательно снижение входной скорости заготовки ниже 0,07–0,08 м/с, а также нежелательно увеличение сечения заготовки больше 150 мм из-за значительного увеличения в этом случае габаритов клетки. Малогабаритные обжимные группы клеток целесообразно применять в качестве обжимных агрегатов высокопроизводительных сортовых станов и совмещенных ЛПА.

Сортовые планетарные клетки продольной прокатки обеспечивают сверхвысокую вытяжку (до 40), возможность прокатки высокопрочных сталей и сплавов.

РКМ при производстве сортовых заготовок обеспечивают высокую вытяжку, мягкую схему напряженного состояния. В то же время они имеют огромные динамические нагрузки и уровень шума. Кроме того, они требуют специальных задающих устройств и вытяжных устройств для доковки заднего конца заготовки.

1.6. Совмещенные процессы литья-деформации

1.6.1. Совмещенные процессы литья-прокатки в цветной металлургии

В настоящее время можно считать, что разливка металлов в изложницы при массовом их производстве является неперспективной и должна быть заменена непрерывным литьем. Преимущество непрерывного литья состоит не только в сокращении цикла металлургического производства, но и в повышении качества заготовок из-за высокой однородности металла после литья. Это позволяет снизить технологические отходы при последующей обработке давлением и разброс технологических параметров [2].

Эффективность процессов непрерывного литья еще больше возрастает при объединении литья с прокаткой в одном агрегате. В литейно-прокатных агрегатах (ЛПА) можно использовать литейное тепло слитка для его деформации и исключить промежуточный склад металла. Машины, входящие в ЛПА, становятся все более компактными и универсальными, уменьшается их масса, требуемые для них производственные площади.

При создании ЛПА используются следующие варианты:

– жидкий металл непосредственно поступает в межвалковый зазор;

– начало процесса кристаллизации отделено от прокатки, но прокатка начинается, когда сердцевина слитка находится еще в жидком состоянии;

– прокатка непрерывного слитка осуществляется после момента его полного затвердевания по сечению.

Первый вариант кристаллизации был предложен Бессемером и получил название бесслитковой прокатки. В дальнейшем процесс литья в валковый кристаллизатор усовершенствовали путем подачи жидкого металла не прямо на валки, а через насадки, установленные между валками. При этом удалось стабилизировать угол захвата, который должен быть относительно небольшим и, главное, постоянным. На рис. 1.4 приведены две схемы прокатки жидкого металла.

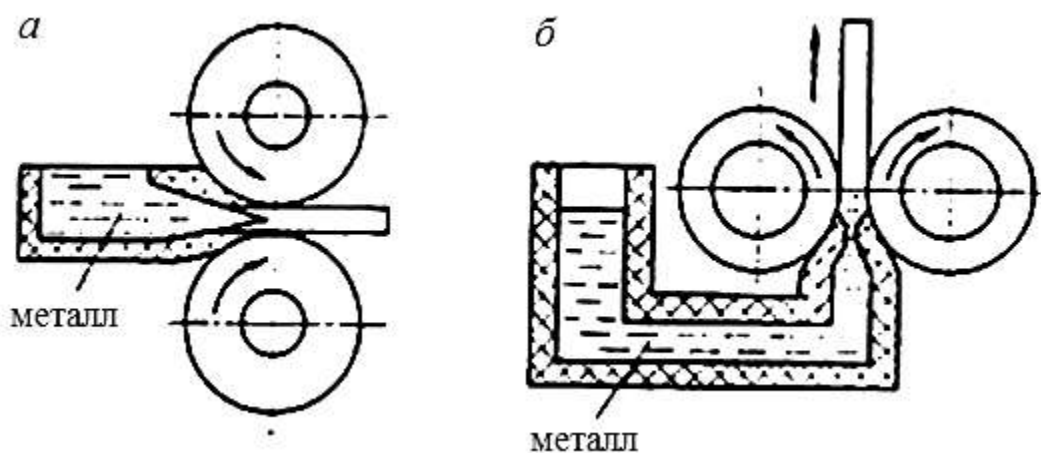


Рис. 1.4. Варианты прокатки жидкого металла: *а* – горизонтальной; *б* – вертикальной

В первом случае (рис. 1.4, *а*) жидкий металл поступает из миксера по желобу в распределительную коробку, межвалковое пространство которое образовано горизонтальными валками-кристаллизаторами. При прокатке металл, соприкасаясь с холодными валками, кристаллизуется в полосу, непрерывно выходящую из валков, вращающихся навстречу друг другу.

Во втором случае (рис. 1.4, *б*) металл проходит между валками, установленными в горизонтальной плоскости. Металл поступает из распределительной коробки через специальную щель в межвалковом пространстве, затем вверх в валки и кристаллизуется в полосу, которая затем правится и сматывается в рулон.

Первый способ реализован, например, на заводе «Красный выборжец» (Санкт-Петербург) для изготовления алюминиевой полосы толщиной 8–12 мм и шириной до 1030 мм в рулонах массой 2 тонны.

По второму способу производится алюминиевая полоса толщиной 3–8 мм и шириной 1000–1600 мм. В ЛПА производятся также свинцовые и цинковые полосы. На рис. 1.5 приведена схема литейно-прокатного агрегата производства ВНИИМетМаш.

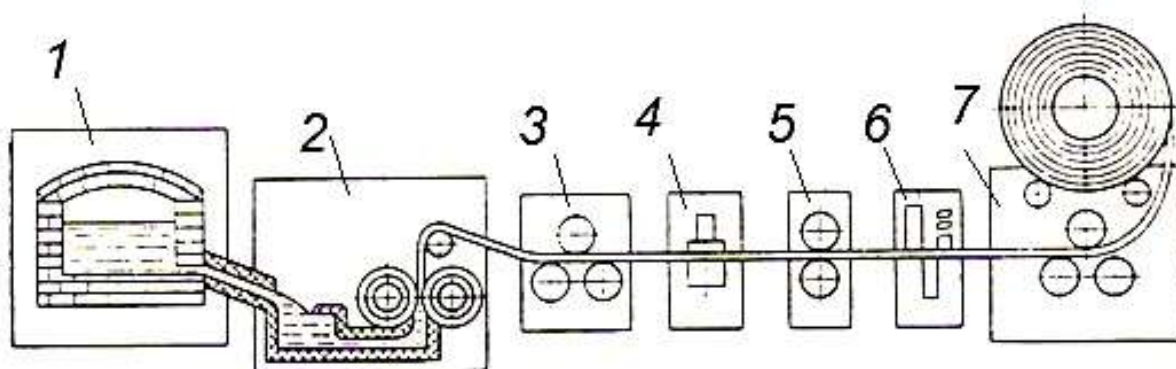


Рис. 1.5. Литейно-прокатный агрегат конструкции ВНИИМетМаш для производства алюминиевой полосы: 1 – миксер; 2 – валковый кристаллизатор; 3 – правильная машина; 4 – центрирующие ролики; 5 – машина для обрезки кромки; 6 – гильотинные ножницы; 7 – моталка

В ЛПА с валковыми кристаллизаторами протяженность кристаллизатора ограничена дугой захвата, и поэтому скорость разливки мала (1–2 м/мин).

Второй вариант бесслитковой прокатки отличается тем, что в нем процессы кристаллизации и деформации частично разделены, то есть слиток с жидкой фазой в середине подвергается прокатке. Этот способ впервые применялся в Австрии и Германии для стали с применением медных кристаллизаторов. Этот процесс позволяет устранить процесс образования усадочной раковины. Однако деформация проходит при температуре перехода из жидкой фазы в твердую, когда пластичность металла очень низкая. При такой деформации в центральной части слитка образуются трещины, которые заполняются расплавом с более высоким содержанием легирующих элементов, что приводит к химической неоднородности проката.

Третий вариант бесслитковой прокатки состоит в прокатке непрерывно образующейся заготовки после окончания кристаллизации, что обеспечивает наилучшее качество металла и позволяет расширять марочный и размерный сортамент прокатки.

Наиболее распространены кристаллизаторы роторного типа, используемые для прокатки алюминия, цинка, олова, меди и сталей. Кристаллизатор представляет собой водоохлаждаемое колесо с желобом, охватываемое стальной лентой. Жидкий металл, подаваемый из

плавильной печи в зазор между колесом и стальной лентой, затвердевает в закрытом калибре и при вращении ротора непрерывно выходит из него с небольшим отклонением в сторону.

Кристаллизаторы роторного типа (рис. 1.6) имеют малую ширину бочки и используются для получения сортовых и ленточных заготовок сравнительно малой ширины (до 400 мм).

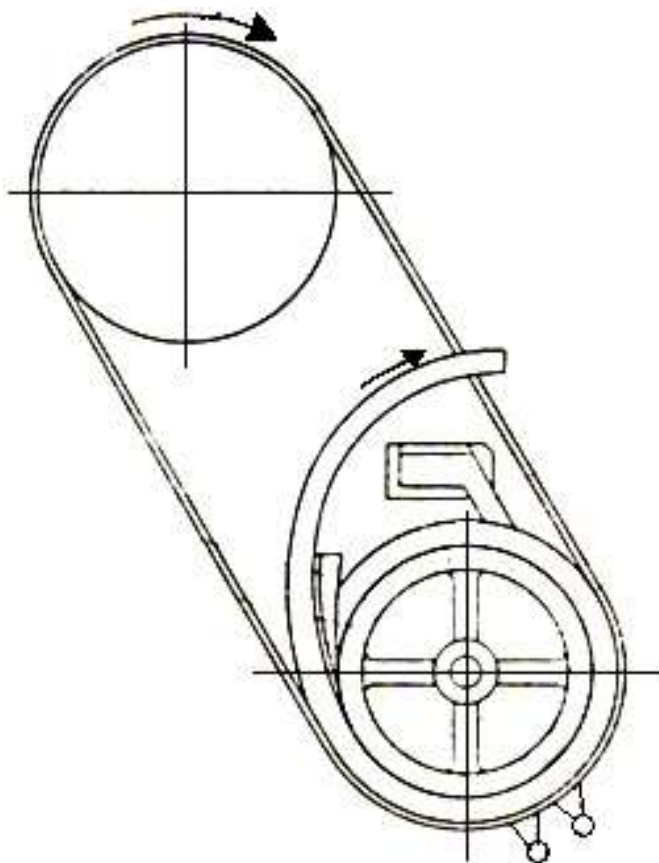


Рис. 1.6. Схема кристаллизатора роторного типа

Для производства широких полос из цветных металлов и сплавов применяются подвижные кристаллизаторы ленточного типа системы «Хазелетт». В таких кристаллизаторах процесс непрерывного литья основан на том, что жидкий металл поступает в зазор, образованный между двумя наклонно расположенными и непрерывно движущимися стальными лентами. Снаружи полосы интенсивно охлаждаются водой.

Толщина отливаемых полос 9–70 мм, ширина – до 1600 мм. Скорость прокатки 5–10 м/мин, что делает эффективным установку прокатного стана за кристаллизатором. Подобные ЛПА широко применяются для производства полос из цинка шириной до 1000 мм и толщиной 12,7 мм. Полоса сразу же прокатывается до толщины 2,5 мм.

В последние годы установки «Хазелетт» (рис. 1.7) стали использовать для изготовления сортовых заготовок. Литейная машина входит в состав ЛПА, производящих медную и латунную катанку.

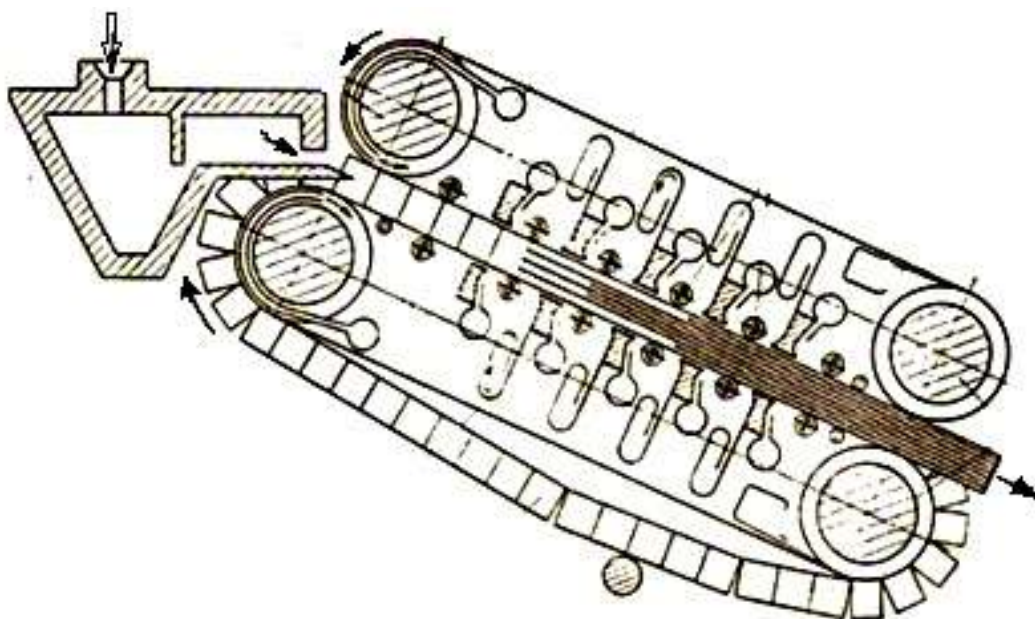


Рис. 1.7. Схема установки «Хазелетт»

Большой прогресс достигнут в использовании установок непрерывного литья с графитовыми кристаллизаторами для производства полос, прутков, труб, проволоочной заготовки и профилей из медных сплавов. Производительность таких установок зависит от размеров отливаемых сечений, марки сплава, числа ниток и срока службы кристаллизатора (0,5 т/ч при отливке прутков и до 1 т/ч при производстве полос и крупных слитков). В связи с ограниченной производительностью установок непрерывного литья через графитовый кристаллизатор их применяют преимущественно при производстве малотоннажной продукции из труднодеформируемых в горячем состоянии сплавов. Одним из недостатков этого способа получения заготовок является низкая стойкость графитовых кристаллизаторов. Эти установки производятся фирмами: «ASARCO» (США); «United Wire» (Великобритания); «Technika - GAUSS» (Германия); «Vertli» (Швейцария); «Meta-term» (Австрия); «OutoKumpu OY» (Финляндия); «Nippon consulting Kogyo KK» (Япония).

Задачи по сокращения разницы в скоростях движения металла в валках прокатного стана и при непрерывном литье заготовок решают одновременно по двум направлениям:

- повышение скорости литья;

– использование станов специальной конструкции.

Повышение роли непрерывных процессов в области производства прокатных изделий привело к созданию автоматизированных комплексов, объединяющих все технологические операции производства. Для производства латунных лент институтом ГИПРОЦМО разработана автоматическая непрерывная линия.

В плавильных печах, число которых неограниченно, плавятся отдельно медь и цинк, которые в расплавленном состоянии подаются в миксер в заданной пропорции. Из миксера, в котором при автоматически поддерживаемой постоянной температуре металл непрерывно перемешивается электромагнитными линейными двигателями, сплав поступает в кристаллизатор (валковый ленточный или роторный). Оттуда горячая заготовка поступает в непрерывный стан горячей прокатки. После охлаждения полоса последовательно проходит через непрерывный стан холодной прокатки, вторую проходную печь отжига, линию продольной резки и агрегат дефектоскопии, контролирующей толщину, сплошность и качество поверхности ленты. После этого готовая лента сворачивается в рулоны и упаковывается.

Число действующих в технологическом процессе клеток каждого прокатного стана, а также использование протяжных печей устанавливается в зависимости от сортамента. При скорости разливки 1–1,5 м/мин, толщине полосы 10 мм и ширине 800 мм производительность комплекса составляет до 40 тыс. тонн в год.

Из известных агрегатов единичного изготовления следует отметить некоторые. Фирма «Albert Mann» (Англия) создала ЛПА, оборудованный ленточным кристаллизатором и четырехвалковой клетью. Этот агрегат позволяет получить алюминиевые полосы до 50 мм толщиной и до 1600 мм шириной. Фирма «London Zine Mills» (Англия) создала ЛПА с машиной конвейерного типа для производства цинковой полосы шириной 1140 мм. МНЛЗ имеет бесконечные стальные ленты толщиной 1,2 мм, шириной 1300 мм, регулируемый зазор между которыми обеспечивает требуемую толщину отливаемой полосы от 9,5 до 76 мм. Металл охлаждается водой, подаваемой из спрейеров на внутреннюю поверхность лент-кристаллизаторов. Ленты можно устанавливать под углом к горизонту от 6 до 90°. Выходящая из кристаллизатора полоса дополнительно охлаждается в охлаждающей камере со спрейерами и поступает в реверсивный четырехвалковый стан, на котором осуществляется горячая или холодная прокатка до 1,5–2,0 мм со скоростью до 24 м/с.

Также среди роторных кристаллизаторов широко распространены кристаллизаторы системы Spidem и Porterfield (рис. 1.8). Эти установки имеют производительность до 4,5 т/час при скорости разливки до 12 м/мин.

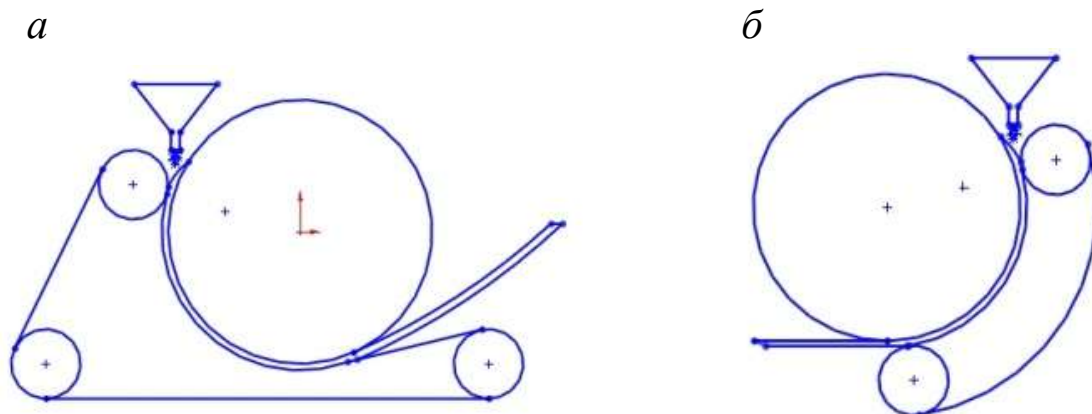


Рис. 1.8. Кристаллизаторы системы Spidem и Porterfield:
а – Spidem; б – Porterfield

1.6.2. Совмещенные процессы литья-прокатки в черной металлургии

Замена технологии разливки стали в изложницы непрерывным литьем рассматривается сегодня как поворотное событие в черной металлургии. Однако анализ, например, техпроцесса листового производства показывает, что возможности непрерывного литья стали используются далеко не полностью.

Толщина производимых на современных МНЛЗ слябов ограничивается пределами 150–300 мм, что позволяет получить качественные листы толщиной не более 15–50 мм. Для прокатки более толстых листов необходимо соответствующее увеличение толщины исходных заготовок. Вместе с тем получение тонких полос и листов связано с необоснованно большими обжатиями непрерывнолитых заготовок. Так, например, для получения жести используются непрерывнолитые слябы толщиной 200–250 мм. Затем на станах осуществляется обжатие с 1000-кратной вытяжкой, сопровождающееся большими затратами энергии. Поэтому актуальной является проблема создания процессов непрерывного литья стали, позволяющих получать заготовки, максимально приближенные по размерам к готовому прокату.

Если исходить из минимально необходимой степени обжатия литых заготовок для получения качественного листа и учитывать широ-

кий сортамент готовой продукции, то литые заготовки по своей толщине должны охватывать диапазон от нескольких миллиметров до 300–400 мм. При этом необходимо помнить, что с уменьшением толщины заготовки возрастает интенсивность теплоотвода от кристаллизующегося металла в процессе литья и соответственно изменяется структура литой заготовки.

Литая заготовка толщиной от 1 до 6 мм обычно используется для холодной прокатки, а более толстые литые заготовки всегда подвергаются предварительной горячей прокатке.

Преимущества технологического процесса производства листового проката посредством непрерывного литья полос и тонких слябов с последующей прокаткой очевидны. При этом достигается существенная экономия энергии. Если сравнивать с традиционной технологической схемой разливки и дальнейшей прокатки, то при непрерывной разливке экономится 0,7–1,5 ГДж/т, при горячем посаде непрерывных слябов – примерно 0,4–0,6 ГДж/т. При реализации схемы прямой прокатки непрерывных слябов экономится до 1 ГДж/т, а при непрерывной отливке тонких слябов и полос – до 4 ГДж/т.

Уменьшение толщины слябов при отливке традиционными способами сопряжено с большими трудностями подвода жидкого металла в кристаллизатор. По схеме, разработанной фирмой «SMS Schloemann Siemag» (Германия), рабочая часть кристаллизатора в верхней части снабжается воронкообразным расширителем, позволяющим использовать обычный погружной глуходонный стакан для подвода металла. В нижней части кристаллизатор имеет параллельные рабочие стенки. На таких машинах отливаются слябы толщиной 40–50 мм и шириной 1200–1600 мм со скоростью 4–6 м/мин. Расстояние между широкими стенками в верхней воронкообразной части кристаллизатора составляет 170 мм.

По другой схеме, разработанной фирмой «Mannesmann Demag» (Германия), подвод жидкого металла производится через специальный плоский огнеупорный стакан в кристаллизатор с параллельными широкими стенками. В верхней части кристаллизатор имеет прямоугольный канал, а в нижней – канал, изогнутый по радиусу. После выхода из кристаллизатора слиток в зоне вторичного охлаждения подвергается редуцированию по толщине параллельными роликами, снабженными гидроцилиндрами нажимного устройства. На участке, где имеется жидкая фаза, деформация слитка может составлять 70 %. Полное обжатие до затвердевания может составлять до 80 %. Такая

схема позволяет получить более тонкие слябы, дает возможность заменять разливочные стаканы и изменять ширину сляба в процессе разливки.

Фирма «Voestalpine» совместно с ОАО «Уралмашзавод» придерживаются концепции отливки слябов толщиной 70–80 мм. В этом случае подвод жидкого металла в кристаллизатор с параллельными стенками осуществляется традиционным способом, что повышает надежность машины и качество тонких слябов. При установке тонкослябовой МНЛЗ в литейно-прокатный агрегат вводятся дополнительно одна или две обжимные прокатные клетки.

Наиболее типовой конструкцией литейно-прокатных агрегатов в производстве стальных листов можно считать агрегат фирмы «Schloemann Siemag». Производительность их агрегатов до 820 тыс. т/год при минимальной скорости разливки 6 м/мин и сечении литой заготовки 50×1350 мм. Отлитая на МНЛЗ полоса разрезается на слябы мерной длины, которые транспортируются через проходную нагревательную печь, прокатываются на непрерывном четырехклетевом прокатном стане до 2,5 мм и менее, а затем лента сматывается в рулон и после струйного охлаждения передается на прокатку.

Существуют и другие варианты литейно-прокатных агрегатов. Так, например, при отливке слябов толщиной менее 40 мм литая полоса непосредственно на МНЛЗ может сматываться в рулоны, которые в горячем состоянии передаются на прокатный стан. В этом случае можно подобрать оптимальную массу рулона с точки зрения прокатки, а общая площадь, занимаемая ЛПА, значительно меньше, чем в традиционном варианте.

Отливка полос толщиной до 10 мм для последующей холодной прокатки возможна только при условии отсутствия скольжения между рабочей поверхностью кристаллизатора и полосой, как при методе намораживания стали на один или два валка-кристаллизатора.

Рядом фирм ведутся работы по получению полосы из жидкого металла путем намораживания на движущуюся охлаждаемую поверхность. Значительные успехи достигнуты в кристаллизации лент до 100 мкм таким способом.

Перспективным современным направлением развития технологии прокатки листов является замещение холоднокатаных листов горячекатаными. На современных станах выкатывается лист толщиной до 0,8 мм. Конфигурация таких станов может быть различной. Как пра-

вило, прокатный стан в таких случаях разделен на группу предварительной деформации и на чистовую группу, между которыми расположены устройства для нагрева и перемотки раскатов. Толщина отливаемого сляба находится в пределах 40–75 мм, толщина проката для промежуточного перемоточного устройства 15–20 мм. Минимальная толщина горячекатаной полосы, полученная на пятиклетевой чистовой группе, составляет 1 мм.

Для существующих широкополосных станов, программу которых расширяют за счет производства полос толщиной меньше проектной, весьма привлекательной могла бы стать идея теплой прокатки. По всей видимости, полосы толщиной менее 1 мм будут иметь указанную температуру при умеренных скоростях деформации. Деформация при температуре 300–500 °С требует радикального уменьшения диаметра рабочих валков последних клеток непрерывного широкополосного стана и, возможно, изменения расположения и типа сматывающих устройств. К сожалению, законченной научно-обоснованной концепции формирования структуры, механических свойств стального проката, полученного с помощью теплой деформации, пока нет.

Другим способом получения особотонких горячекатаных полос можно считать создание комплекса, способного обеспечить прокатку в непрерывной группе широкополосного стана заготовки толщиной 4–7 мм при температуре начала прокатки 1100–1150 °С (рис. 1.9).

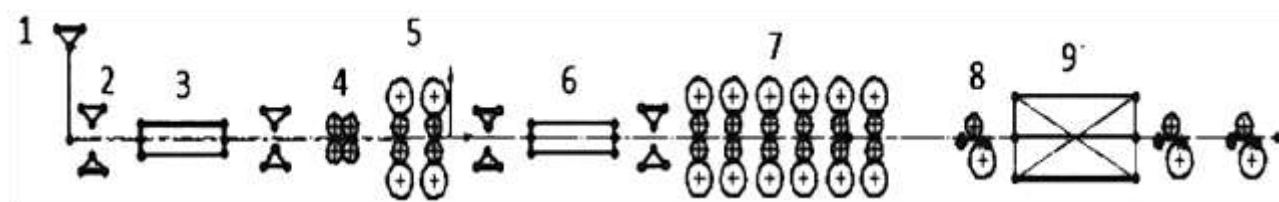


Рис. 1.9. Схема комплекса: 1 – МНЛЗ для литья тонких слябов; 2 – ножницы; 3 – печь с роликовым подом; 4 – система удаления окалины; 5 – черновая группа клеток; 6 – печь с роликовым подом; 7 – чистовая группа клеток; 8 – моталка; 9 – участок контролируемого охлаждения

Технология такого комплекса включает отливку сляба толщиной 45–60 мм, нагрев и выравнивание температуры в печи с роликовым подом, деформацию сляба в черновой группе клеток до 5–7 мм, нагрев раската в печи с роликовым подом и защитной атмосферой и прокатку в непрерывной чистовой группе клеток. На таком комплексе можно прокатывать полосы толщиной до 0,6 мм при температуре конца прокатки 750 °С и скорости 15 м/с. Комплекс позволяет прово-

дить полунепрерывную прокатку, так как в противном случае длина печи может достичь 200 м.

Начало применения сочетания непрерывной разливки стали с сортовой прокаткой относится к периоду 1960–1965 гг. Было установлено, что сортовой прокат, полученный из непрерывно-литых заготовок, удовлетворяет современным требованиям, МНЛЗ успешно могут заменить обжимные станы в сортопрокатных цехах. Современный технологический процесс имеет ряд преимуществ:

- снижение расхода металла;
- повышение производительности МНЛЗ;
- исключение дополнительных затрат на резку;
- уменьшение энергозатрат на нагрев и транспортировку металла.

На МНЛЗ отливают слитки различных марок сталей и сечений: круглые диаметром 100–500 мм, квадратные со стороной 50–350 мм. Непрерывно-литые слитки по размерам сечений соответствуют катаным блюмам и сортовым заготовкам. Широкий сортамент прокатных станов оказывает влияние на схемы ЛПА в сортовой прокатке.

Реализуются в основном две схемы:

- МНЛЗ – чистовой стан;
- МНЛЗ – заготовочный стан – сортовой стан.

При работе по первой схеме непрерывно-литые заготовки поступают на чистовые блоки клетей. Прокатка осуществляется с одним нагревом. При работе по второй схеме непрерывно-литые заготовки после контроля качества поверхности и отделки прокатываются на заготовку требуемых размеров для сортовых станов. Прокатка осуществляется за два нагрева. Для этой схемы характерен ограниченный сортамент заготовок.

При сочетании МНЗ с крупными заготовочными станами, прокатывающими готовый сорт и передельную заготовку, могут быть реализованы первая и вторая схемы и их вариации.

Первая схема с точки зрения сокращения цикла производства является предпочтительной. Однако при этом необходимо получить заготовки малых сечений, а в ряде случаев – заготовки широкого сортамента.

Сортовая прокатка из непрерывно-литых заготовок имеет ряд недостатков:

- трудности получения на МНЛЗ сортовых заготовок мелких сечений;

- ограничение сортамента прокатной продукции по мере уменьшения сечения кристаллизатора;
- усложнение конструкции МНЛЗ, увеличение числа ручьев;
- снижение производительности МНЛЗ из-за переналадок при широком сортаменте непрерывно-литых заготовок.

Применение технологии производства сортового проката из литых блюмов за два нагрева позволяет упростить конструкцию и работу МНЛЗ и повысить качество проката. Однако эта схема также имеет недостатки:

- трудности контроля качества и зачистки проката в промежуточном обжатом состоянии в потоке;
- дополнительные расходы на нагрев.

Эффективно использование редуцирования литых слябов по ширине для получения сортовой заготовки. На основе процесса редуцирования созданы новые схемы сочетания МНЛЗ и прокатки.

При совмещении процессов литья и прокатки возникают трудности, связанные с разницей скоростей выхода металла из МНЛЗ и входа в валки.

Известны следующие схемы прямого совмещения литья с прокаткой:

- жидкий металл непосредственно поступает в межвалковое пространство;
- начало процесса кристаллизации отделено от процесса деформации, прокатка начинается, когда середина слитка еще не успела кристаллизироваться;
- прокатка после окончательной полной кристаллизации.

Первая схема нашла применение только в цветной металлургии.

Способ обжатия непрерывно-литой заготовки с жидкой сердцевинной, то есть в двухфазном состоянии, предложен фирмой «BOHLER» (Австрия). Способ предусматривал отливку блюма 140×140 мм и дальнейшую прокатку в четырех клетях на квадрат 80×80 мм. Проведенные опыты показали сложность процесса обжатия литой заготовки с жидкой серединой. К конструкциям прокатных клетей совмещенных агрегатов, а также к их работе предъявляются высокие требования: компактность, согласование скоростей литья и прокатки, высокая надежность узлов.

Совершенствование технологии прокатки холоднокатаной полосовой и листовой стали осуществляется в целях повышения производительности, качества и снижения отходов металла.

Рост производительности непрерывных станов холодной прокатки происходит за счет увеличения массы рулонов до 50 тонн и скоростей до 35–50 м/с. При этом количество клеток доводится до 5–8. В станах используются шестивалковые клетки с повышенной жесткостью (20–30 МН/мм) и гидравлические нажимные устройства с плавным регулированием модуля жесткости по длине валка в широком диапазоне. Гидравлические нажимные устройства дают возможность в несколько раз увеличить скорость срабатывания, что позволяет повысить эффективность работы САР толщины полосы.

Непрерывные станы холодной прокатки оборудуются устройствами для регулирования поперечной разнотолщинности полосы (противоизгибом, дополнительным изгибом, тепловым полем валка) и совмещенными системами регулирования поперечной и продольной разнотолщинности.

Повышение производительности и качества полосовой стали и выхода годного металла достигается бесконечной прокаткой. На качество продукции и производительность станов холодной прокатки существенное влияние оказывают надежность и долговечность валков. Для повышения производительности эффективным способом является совмещение стана холодной прокатки с линией травления подката, которые при необходимости могут работать отдельно.

Основными функциями систем автоматического управления станов холодной прокатки является автоматическая настройка каждой клетки стана при изменении программы прокатки, управление подачей рулонов и заправкой полосы в стан, регулирование натяжения полосы, автоматические разгон и торможение стана, регулировка теплового профиля валка.

1.7. Перспективные направления развития техники и технологииковки и штамповки

Технологии кузнечно-штамповочного производства наиболее консервативны среди других процессов ОМД, что в основном связано с дорогостоящим оборудованием чаще всего универсального применения и малым разнообразием исходных заготовок, получаемых либо дополнительным литьем, либо прокаткой или ковкой. Слитки для свободнойковки, имеющие большие поперечные сечения, характеризуются значительной структурной и химической неоднородностью. В

связи с этим необходимы операции по набору уковки, которые занимают значительное время, несоизмеримое с длительностью формообразующих операций свободнойковки. Многочисленные промежуточные операции нагрева слитка при наборе уковки повышают угар металла (иногда до 7 %) и резко повышают энергозатраты процессаковки из слитка. Заготовки, полученные прокаткой, как правило, имеют острую продольную текстуру, которая наследуется текстурой рекристаллизации, что в итоге создает значительную анизотропию механических свойств. Этот факт приходится учитывать при дальнейшем расположении заготовки в штампе на стадии штамповки.

Технологии горячей объемной штамповки на отечественных предприятиях сориентированы по большей части на крупносерийное производство однотипных поковок. Для каждой конкретнойковки проектируется и изготавливается дорогостоящий штамп, окупаемость которого возможна лишь при достаточно больших партиях продукции. В современных условиях, когда жизнь машиностроительных изделий (до морального и технического износа) непрерывно сокращается, возрастает необходимость в расширении сортамента поковок при уменьшении объемов выпуска каждого конкретного изделия. Поэтому экономическая целесообразность изготовления штампов далеко не очевидна.

В настоящее время перспективными направлениями развития техники и технологии ковочно-штамповочного производства (КШП) следует считать:

- применение в качестве заготовок слитков, полученных непрерывным либо полунепрерывным литьем, в частности представляется возможным использовать непрерывно-литые слябовые заготовки;

- разработку обрабатывающих агрегатов свободнойковки, совмещенных с машиной непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и оснащенных автоматизированным магазином инструментальной оснастки и кузнечного инструмента;

- применение специальных видовковки и штамповки:

- 1) радиальное обжатие;

- 2) поперечно-винтовая деталепрокатка;

- 3) поперечно-клиновая деталепрокатка;

- 4) валковая раскатка колец;

- 5) ковка и штамповка с кручением;

- 6) ковка крупногабаритных плит из полый непрерывно-литой заготовки.

В области холодной объемной штамповки метизного производства эффективен отказ от автоматов, совмещающих все операции изготовления крепежных изделий из проволочной или прутковой заготовки, и переход к высокопроизводительным автоматам, предназначенным для выполнения лишь одной операции.

В листоштамповочном производстве на современном этапе развития техники и технологии представляют интерес:

- автоматизированные комплексы безраскройной штамповки;
- универсальные гидравлические прессы для поэлементной штамповки листовых деталей, оснащенные автоматизированным магазином инструмента;
- автоматизированные лазерные комплексы для контурной обработки формованных листовых деталей.

Для получения крупных поковок необходим слиток достаточно большого объема. Отливка заготовок большого поперечного сечения всегда сопровождается появлением дефектов литой структуры металла. Эффективной мерой по снижению количества таких дефектов является уменьшение толщины отливаемых слабов. Слитки полунепрерывного литья – один из прогрессивных видов кузнечных заготовок. При замене ими традиционных кузнечных слитков наполнительного литья экономится до 20–25 % металла, уменьшается энергопотребление на нагрев под ковку.

В свое время в практику КШП стал активно внедряться процесс получения круглых заготовок из непрерывно-литых слабов сравнительно малой толщины. Новый способ деформации был предложен ОАО «Уралмаш» и УПИ. Технологический процесс получения круглых поковок из слитков МНЛЗ выглядит следующим образом. Получаемый на МНЛЗ слаб разрезается на мерные длины. Слябы задаются в печь и нагреваются до температуры прессования. Нагретый слаб выдается из печи и передается на горизонтальный гидравлический пресс. С помощью загрузочного устройства слаб устанавливается в круглый контейнер прессы. Далее слаб осаживается в контейнере и приобретает форму цилиндра. После окончания процесса осадки крышку контейнера открывают и цилиндрический слиток выталкивают. Полученная таким образом заготовка без дополнительной проковки готова для выполнения формообразующих операций.

Подобная технология производства заготовок позволяет значительно повысить качество металла, поскольку при отливке сравнительно тонкого ($b / a = 2,5–4,0$, где a и b – размеры сечения) слэба

скорость кристаллизации по всему сечению достаточно высока и зона равноосных кристаллов либо не развита, либо отсутствует. Ликвационные процессы не успевают развиться и породить химическую неоднородность сплава по сечению слитка. Кроме того, предварительная деформация осадки в контейнере прессы со степенью уковки $\varphi = \frac{\pi K^2 + 1}{4K}$ с получением заготовки высотой $h_k = \frac{\pi K^2 + 1}{4K} h_0$, где h_0 – исходная длина сляба, формирует радиальную текстуру рекристаллизации, что при дальнейшем нагреве под ковку интенсифицирует диффузию и выравнивание химического состава по сечению.

Эффективность применения непрерывно-литой заготовки можно показать на примере изготовления плит из высоколегированных алюминиевых сплавов.

К настоящему времени разработано достаточно много технологических вариантовковки таких поковок как из слитков, так и из непрерывнолитых заготовок, имеющих ограниченную пластичность в литом состоянии при использовании схем напряженного состояния, характерных для традиционных операций свободнойковки. Все известные методыковки нацелены на проработку литой структуры и достижение однородности степени деформации в объеме поковки. Описанные технологии многооперационны и требуют промежуточных подогревов металла, что существенно снижает производительность. В применяемых технологиях однородность и изотропность металла в объеме плит не достигается.

Финишные операции этого способа традиционные: механическая обработка на фрезагрегатах, закалка со старением, окончательная правка.

Полунепрерывным литьем получают полую заготовку с термически тонкой стенкой объемом двух готовых плит с учетом определенного заправочного коэффициента. В качестве исходной кузнечной заготовки рассматривается полый гомогенизированный и механически обработанный слиток. После нагрева до ковочной температуры заготовка помещается в цилиндрический контейнер и осаживается вдоль оси практически до замыкания полости. Такой способ закрытой осадки гарантирует отсутствие потери устойчивости стенки и позволяет даже за одну операцию осадки достичь высокой степени деформации:

$$\varepsilon = \ln \frac{F_1}{F_0} = \ln \frac{D^2}{D^2 - d^2} ,$$

где F_1 и F_0 – площадь сечения заготовки после и до осадки; D – диаметр полости контейнера; d – диаметр полости заготовки.

Последующая закрытая прошивка в этом же контейнере пуансоном диаметром d практически восстанавливает исходную форму и размеры исходной заготовки. При этом накопленная за цикл «осадка – прошивка» степень деформации удваивается. Цикл деформирования таким способом может быть повторен n раз с накоплением суммарной степени деформации $\varepsilon_{\Sigma} = 2n\varepsilon$. Схема напряженного состояния в этих операциях благоприятна для высокой пластичности металла и гарантирует отсутствие разрушения даже малопластичных сплавов. После обеспечения требуемой степени уковки (в принципе бесконечно большой) прошивком осуществляется просечка доньшка и полая заготовка выпрессовывается из контейнера. Последующая свободная осадка на гладких плитах готовит заготовку под раскатку (кузнечную или валковую) кольца. Во время раскатки формируется поперечное сечение стенки, соответствующее поперечному сечению будущей плиты. Раскатанное кольцо на оправке зарубается топором по диаметру на глубину 0,85–0,90 толщины стенки кольца. Далее кольцо устанавливают на гладкую плиту так, что диаметральной плоскостью зарубок параллельна плите, и расплющивают верхней плитой прессы до полного смыкания полости. Металл недорубов, играющий роль шарниров при сплющивании, удаляется фрезерованием, при котором плиты разделяют и направляют на дальнейшую термическую и механическую обработку.

Современная наука и промышленные предприятия единичного и мелкосерийного производства накопили богатый арсенал эффективных способов деформирования при свободной ковке (осадка со сдвигом или кручением, секционная ковка, валковая раскатка и др.). Однако эти способы с трудом входят в технологию из-за сложности их реализации на кузнечном оборудовании свободнойковки. Отсюда технологический консерватизм в области кованных заготовок. Даже современные ковочные комплексы не внесли принципиальных изменений в технологию свободнойковки.

При создании обрабатывающих центров удастся по-новому решить композиционную структуру кузнечной машины, пригодной не только для выполнения традиционных операций свободнойковки, но и позволяющей применять новые не характерные дляковки на молотах и прессах процессы. Структура обрабатывающего центра (ОЦ) решает проблемы комбинирования нагрузок, формирования новых

форм очага деформации, эффективного использования магазина инструментов.

Оптимизация структуры ОЦ достигается минимизацией количества исполнительных механизмов, при которой возможна реализация всех известных способов свободнойковки, и всех транспортных и манипуляционных операций с заготовкой и инструментом. Оптимальная структура ОЦ сведена к двум радиально-обжимным блокам, снабженным поворотом и осевым перемещением, к валковому устройству, многоножевым ножницам и автоматизированному магазину инструментальной оснастки.

Например, вертикальный обрабатывающий центр пластического формообразования поковок в состоянии автоматически без остановок на переналадку выпускать поковки широкой номенклатуры из непрерывно-литых полых заготовок. В ОЦ автоматизирован не только технологический цикл получения поковок, начиная с разливки металла, но и вспомогательные операции ОЦ: осевое перемещение поковок или литой заготовки, вращение поковок вокруг оси на заданный угол, осевое заданное перемещение ковочных и отрезных блоков, ввод оправок и раскатных валков в полость поковки, передача инструмента из магазина в бойки ковочных блоков, извлечение инструмента из полости поковки, возврат инструмента в магазин, перемещение части заготовки в индуктор для подогрева и возврат в зону обработки, удаление поковок из зоны обработки и передача их в приемный короб.

Заготовка для изготовления поковок производится вертикальной машиной непрерывной разливки и без предварительной разрезки и охлаждения передается вверх в деформирующую часть ОЦ. Главной технологической особенностью вертикальной разливки является формирование полый одно- или многослойной заготовки последовательным ее вытягиванием с большим (до 500 мм) шагом вверх.

В состав деформирующего агрегата, располагающегося на техническом этаже по оси разливки над литейной машиной, включены два радиально-обжимных блока, раскатное устройство и автоматизированный магазин инструмента.

Присутствующий в полый заготовке нейтральный газ предотвращает окисление внутренней поверхности. Формирование слитка со сравнительно тонкой стенкой, т. е. использование в заготовке только коркового металла, кристаллизующегося с большой скоростью при однородном фронте теплоотвода гарантирует мелкозернистую структуру и подавление ликвации примесей и легирующих добавок в ста-

ли. Качество литой заготовки может улучшаться за счет циклического движения вдоль фронта кристаллизации, легко осуществимого в данной конструкции литейной машины.

Поскольку литейная машина позволяет производить непрерывно-литые заготовки, лишенные основных дефектов слитков наполнительного литья, то обрабатывающий центр освобождается от традиционных при свободной ковке операций по набору уковки, имеющих целью разрушить литую структуру и устранить ликвационную неоднородность заготовок. В связи с этим все технологические операции свободнойковки ОЦ являются формообразующими, что сокращает время обработки и уменьшает угар металла при многочисленных нагревах заготовки.

Подобный ОЦ предназначен для изготовления поковок гладких и ступенчатых валов круглого или прямоугольного сечения, дисков, втулок, обечаек, колец, некоторых поковок с искривленной осью. Чрезвычайно богатые технологические возможности ОЦ позволяют существенно расширить эту основную номенклатуру поковок.

Основные преимущества ОЦ перед всеми известными агрегатами, ныне используемыми в свободной ковке:

- неограниченно широкий набор технологических операций и приемов свободнойковки, предоставляющий технологу возможность непрерывно совершенствовать техпроцесс и даже оптимизировать его, задаваясь различными целевыми функциями:

- возможность выполненияковки либо без переналадки инструментальной оснастки, либо с очень оперативной автоматической переналадкой;

- полная автоматизация технологического процесса свободнойковки, в частности крупных поковок с использованием не специализированных управляющих вычислительных блоков и систем, а серийно выпускаемых дешевых и надежных микропроцессорных средств;

- возможность эффективного совмещения САПР ТП свободнойковки с АСУ ТП, полностью исключающего бумажное представление технологического процесса;

- высокая производительность свободнойковки, определяемая возможностью изготовления практически любой крупной поковки за один нагрев, применением новых операцийковки и эффективным использованием удлиненных слитков и непрерывных заготовок;

- повышенная точность поковок за счет более строгого контроли-

рования положения границ очага деформации при выполнении всех операций свободнойковки как традиционных, так и новых, присущих только данному ОЦ;

- высокий коэффициент использования металла за счет повышения точностиковки и снижения угара металла.

При изготовлении всей широкой номенклатуры поковок на ОЦ в распоряжении технолога и кузнеца имеется следующий основной набор операций, определяемых комплектом инструмента в магазине:

- свободнаяковка;
- осадка в подкладных кольцах;
- осадка со сдвигом;
- осадка с одновременным кручением и сдвигом;
- заковка цапфы;
- протяжка по схемам «круг – квадрат», «круг – восьмиугольник», «круг – прямоугольник», «квадрат – прямоугольник», «прямоугольник – прямоугольник»;
- осевое скручивание заготовок и поковок;
- валковая и сферодвижная раскатка дисков;
- растяжка с кручением дисков со ступицей;
- прошивка полыми и сплошными прошивнями;
- ковка полых поковок на оправках;
- растяжение колец на раздвигающихся бойках;
- валковая раскатка втулок, колец и обечаек с гладкими и фасонными внутренними и наружными поверхностями с торцевой правкой поковок;
- засечка;
- передача;
- высадка буртов и фланцев;
- зацентровка поковок валов;
- скальпирование поковок.

Принципиально новый подход к компоновке ОЦ, применение оптимальной архитектуры машины, отказ от сложившихся в области свободнойковки технологических и конструктивных стереотипов, затормозивших развитие способов изготовления крупных поковок, порождают новый технологический объект. Такой объект свободен от известных недостатков современной технологии свободнойковки и пригоден как для реализации известных, но не применяемых из-за отсутствия соответствующего оборудования способовковки, так и для порождения целого ряда совершенно новых технологических прие-

мов, не нуждающихся в роботах и манипуляторах, но в то же время полностью автоматизированных на базе серийных микропроцессорных средств.

1.8. Расчет энергосиловых параметров и энергосбережение при листовой прокатке

Листовая прокатка применяется для получения плит, листов, ленты и фольги и осуществляется в гладких валках. Из всех процессов ОМД прокатка является наиболее производительным процессом деформации. В зависимости от организации теплового режима процесса различают горячую и холодную прокатку.

Если выполняется условие несжимаемости, то при прокатке на валках с гладкой бочкой $\lambda \times \beta \times \eta = 1$, где $\lambda = l_1/l_0$ – коэффициент вытяжки; $\beta = b_1/b_0$ – коэффициент уширения; $\eta = h_1/h_0$ – коэффициент высотной деформации. При плоской прокатке (без уширения) $\lambda = 1/\eta$.

Параметрами очага деформации при прокатке на гладкой бочке являются:

- угол захвата $\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{D}\right)$, где D – диаметр валков (приближенные значения угла захвата α , рад, определяются по формуле $\alpha = \sqrt{\Delta h/R}$);

- длина очага деформации $l = \sqrt{\Delta h R - (\Delta h/2)^2} \approx \sqrt{\Delta h R}$;

- угол опережения γ при $l/h_{cp} > 3$ определяется по формуле Экилунда $\gamma = \arcsin\left[\sin \frac{\alpha}{2} - \frac{1 - \cos \alpha}{2\mu}\right]$, где μ – коэффициент трения, в общем случае по упрощенной формуле $\gamma = \frac{\alpha}{2}\left(1 - \frac{\alpha}{2\mu}\right)$;

- относительное опережение $S = \frac{V_1 - V}{V} = \frac{V_1}{V} - 1$, где V_1 – скорость полосы на выходе из валков ($V = 2\pi R n$ – окружная скорость валка, здесь n – частота вращения валков), определяется по одной из простых формул:

$$S = (1 - \cos \gamma) \left(\frac{D}{h_1} \cos \gamma - 1 \right) - \text{формула Финка};$$

$$S = \left(\frac{\gamma}{2} \right)^2 \left(\frac{D}{h_1} - 1 \right) - \text{формула Экилунда};$$

$$S = \gamma^2 \frac{R}{h_1} - \text{формула Головина.}$$

Высота нейтрального сечения h_γ в условиях холодной прокатки с натяжением рассчитывается по формуле

$$h_\gamma = h_1 \left(\frac{1 + \sqrt{1 + (\xi_0 \delta - 1)(\xi_1 + 1)(h_0/h_1)^\delta}}{\xi_1 \delta + 1} \right)^{1/\delta},$$

где $\delta = \frac{2\mu l}{\Delta h}$ – степенной коэффициент, $\xi_0 = \frac{\sigma_0}{2\tau_s}$ и $\xi_1 = 1 - \frac{\sigma_1}{2\tau_s}$ – коэффициенты заднего и переднего натяжений, σ_0 и σ_1 – напряжения заднего и переднего натяжений, при этом

$$0 < \frac{\sigma_0}{2\tau_s} < 0,4; \quad 0 < \frac{\sigma_1}{2\tau_s} < 0,4.$$

Скорость деформации при прокатке в технологических расчетах определяется по формулам

$$\varepsilon = V \frac{\alpha}{h_{\text{ср}}}, \text{ где } h_{\text{ср}} = \frac{h_0 + h_1}{2} - \text{формула Экилунда;}$$

$$\text{или } \varepsilon = V_1 \frac{\alpha}{h_0} - \text{формула Целикова.}$$

К энергосиловым параметрам прокатки относятся усилие прокатки P , момент прокатки M и мощность прокатки N .

В практических расчетах $P = p \cdot F$, где p – среднее давление металла на валки, F – площадь контактной поверхности.

Среднее контактное давление рассчитывается по формуле $p = 1,15\sigma_s n_\sigma$, где n_σ – коэффициент напряженного состояния.

$$n_\sigma = n_{\sigma\mu} n_{\sigma\text{в}} n_{\sigma\text{н}},$$

где $n_{\sigma\mu}$, $n_{\sigma\text{в}}$ и $n_{\sigma\text{н}}$ – коэффициенты, учитывающие соответственно влияние внешнего трения, внешних зон и натяжения.

Влиянием внешних зон при листовой прокатке обычно пренебрегают, поэтому $n_{\sigma\text{в}} = 1$. Если натяжение отсутствует, то $n_{\sigma\text{н}} = 1$. Рекомендуется при расчетах коэффициент $n_{\sigma\mu}$ определять в зависимости от формы очага деформации и условий прокатки:

– при горячей прокатке

$$n_{\sigma\mu} = 1 + \frac{1}{6} \frac{l}{h_{\text{ср}}} \text{ при } \frac{l}{h_{\text{ср}}} = 1 \dots 2;$$

$$n_{\sigma\mu} = \frac{2h_\gamma}{\Delta h(\delta-1)} \left[\left(\frac{h_\gamma}{h_1} \right)^\delta - 1 \right] \text{ при } \frac{l}{h_{\text{ср}}} = 2 \dots 4;$$

$$n_{\sigma\mu} = 1 + \frac{1}{4} \frac{l}{h_{\text{ср}}} \text{ при } \frac{l}{h_{\text{ср}}} > 4;$$

– при холодной прокатке

$$n_{\sigma\mu} = \frac{2h_Y}{\Delta h(\delta-1)} \left[\left(\frac{h_Y}{h_1} \right)^\delta - 1 \right], \text{ где } \frac{h_Y}{h_1} = \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1)(h_0/h_1)^\delta}}{\delta + 1} \right]^{1/\delta}.$$

При простом случае прокатки момент, необходимый для вращения обоих валков стана, определяется по формуле $M = 2P\psi l$, где ψ – коэффициент плеча приложения равнодействующей полного давления металла на валки. По методике А.А. Королева ψ можно определить по формуле $\psi = \frac{1}{1-\varepsilon} \left[1 - \varepsilon \left(\frac{e^m}{e^m - 1} - \frac{1}{m} \right) \right]$, где $m = \frac{\mu l}{h_{\text{ср}}}$, или при ориентировочных оценочных расчетах принимать $\psi = 0,5$.

Мощность прокатки $N = M \cdot \omega$, где $\omega = \pi n / 60$ – угловая скорость вращения валков; n – частота вращения валков, об/мин.

При тонколистовой прокатке контактные давления могут оказаться настолько значительными, что приведут к упругой деформации поверхности валка и прокатываемой полосы. Решение упругой задачи контакта плоскости и цилиндра приводит к системе уравнений, из которой можно определить увеличение дуги захвата, связанное с таким явлением, как увеличение площади контактной поверхности, удельных и полных нагрузок на валки [3]. Как видно из рис. 1.10, длина дуги захвата увеличивается при сплющивании от величины l до величины l_c , а полоса покидает очаг деформации на расстоянии x_2 от плоскости, соединяющей оси валков.

Расстояние от плоскости, соединяющей оси валков, до выхода из очага деформации определяется по формулам:

– для упругого сжатия валка

$$x_B = 8pR(1 - \nu_B^2)/(\pi E_B);$$

– для упругого сжатия полосы

$$x_{\Pi} = 8pR(1 - \nu_{\Pi}^2)/(\pi E_{\Pi});$$

– при учете суммарного эффекта рассчитывают величину

$$x_2 = x_B + x_{\Pi}.$$

Далее с ее помощью вычисляют длину очага деформации с учетом сплющивания по формуле

$$l_c = x_2 + \sqrt{l + x_2^2}.$$

Прямым расчетом x_2 и l_c определить не удастся, поскольку они за-

висят от среднего удельного давления, а последнее зависит от соотношений, включающих длину очага деформации, поэтому следует использовать метод итераций.

Для анализа энергетических затрат используют несколько методов расчета; некоторые из них будут проанализированы ниже.

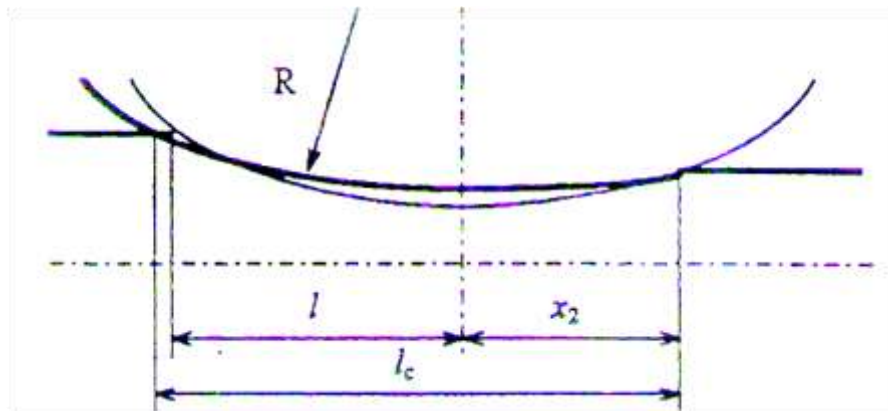


Рис. 1.10. Схема упругого сплющивания вала и полосы

1.8.1. «Экономический» метод анализа энергозатрат

Суммируется установленная паспортная мощность оборудования, установленного на данном производстве, умножается на часовой фонд работы оборудования. Полученная энергия делится на массу произведенной продукции. Этот вариант часто является базовым в экономических расчетах. Метод крайне не точен, поскольку установленная мощность в реальных процессах работы механических систем и тепловых агрегатах никогда не используется полностью. При установленной мощности привода прокатного стана 100 кВт потребная мощность в отдельных проходах может составлять доли процента. То же относится и к работе тепловых агрегатов.

1.8.2. «Эмпирический» метод анализа энергозатрат

Измеряется расход энергии в целом по производству или цеху. Расход делится на количество произведенной продукции. Метод плохо подходит к анализу работы предприятий цветной металлургии, в которых сортамент продукции очень большой и переход с одного типа полуфабрикатов на другой может осуществляться в течение одной смены несколько раз. Возможно применение метода для отдельно стоящего агрегата, например прокатного стана или нагревательного устройства, но в реальных условиях, как правило, на агрегатах нет измерителей потребляемой мощности или энергии.

1.8.3. «Теоретический» метод анализа энергозатрат

С позиций физики процесса оцениваются затраты энергии на нагрев или осуществление работы деформации. Несовершенство оборудования и технологии оценивается коэффициентом полезного действия (КПД). Точность метода определяется знанием реального КПД устройства. Метод хорош тем, что он не зависит от субъективных факторов при потерях энергии из-за низкой дисциплины производства, а отражает физическую сущность явлений. Именно поэтому он выбран в качестве базового для проведения анализа.

Снижение энергоемкости процесса прокатки возможно за счет оптимизации теплового режима. Известно, что затраты энергии на нагрев металла могут составлять до 80–90 % от суммарных затрат энергии на производство листового проката. Если отсутствуют ограничения по пластичности металла, то целесообразно катать захлажденный или даже холодный металл.

Еще одним вариантом экономии затрат энергии является литье относительно тонкой заготовки и последующая холодная прокатка без применения горячей прокатки. Энергетические затраты на такой передел значительно меньше, чем на передел, включающий горячую прокатку.

Все известные способы прямого совмещения непрерывного литья заготовок с листовой прокаткой следует считать эффективными по энергосбережению.

Следует учитывать, что энергопотребление технологии горячей прокатки во многом зависит от способа нагрева заготовок под деформацию. КПД существующих печей не очень высок, поэтому необходимы разработки новых способов нагрева и сохранения тепла в деформируемой заготовке.

1.9. Расчет энергосиловых параметров и энергосбережение при сортовой прокатке

Бурное развитие вычислительной техники создает благоприятные условия для развития работ по оптимизации прокатного производства. Выбор оптимального варианта сортовой прокатки осуществляется на основе математических моделей, важное место среди которых занимают модели и алгоритмы расчетов энергосиловых параметров.

Методы расчета деформаций и усилий можно разделить на три группы: эмпирические, методы приведенной полосы и методы, основанные на использовании законов механики деформируемого тела.

Эмпирические методы основаны на обобщении накопленного практического опыта проектирования калибровок валков и экспериментальных исследованиях как лабораторных, так и промышленных. Эти методы, как правило, не учитывают влияние всех параметров, характеризующих размеры и форму очага деформации, на формоизменение и усилие прокатки.

Суть методов приведенной полосы состоит в том, чтобы свести расчет деформации при прокатке фасонной полосы в калибре к расчету деформации и силовых условий прокатки соответственной прямоугольной в сечении полосы в гладких валках. По методу приведенной полосы у фасонных и соответствующих им прямоугольных полос совпадают площади поперечного сечения и ширина. В методе А. Ф. Головина предусматривается равенство площадей сечений и отношения сторон профиля. Недостаток этих методов заключается в том, что они не учитывают стесняющее влияние формы калибра и степени его заполнения на уширение металла. В методе Б. П. Бахтинова при прокатке профилей простой формы (круг, квадрат, прямоугольник, шестиугольник) используется схема «равноосное сечение – не равноосное сечение – равноосное сечение» и метод описанных прямоугольников и квадратов.

Благодаря своей простоте методы соответственных полос до сих пор являются основными при проектировании калибровок.

Более точными методами расчета параметров прокатки в калибрах простой формы являются методы, основанные на применении вариационных принципов механики и, в частности, принципа минимума полной мощности. Результаты представляются в виде статистически надежных формул и номограмм.

При простой сортовой прокатке используются следующие калибры:

- прямоугольный (ящичный);
- квадратный;
- круглый;
- шестигранный;
- овальный;
- плоский овальный;
- ребровой овальный (стрельчатый);

- ромбический;
- гладкая бочка.

При описании простой сортовой прокатки используются следующие терминология и параметры:

- кольцевая канавка на бочке валка называется ручьем;
- просвет между сопряженными ручьями одной формы и зазор между бочками валков называется калибром;
- определяющим размером сортопрокатного стана является расстояние между осями валков шестерной клетки чистовой клетки стана;
- диаметр сомкнутых без зазора валков называется начальным диаметром;
- система калибров – последовательность совместимых по формоизменению калибров;
- D_v – диаметр вреза, то есть диаметр по дну ручья ($D_* = D_0 - H_1$, где H_1 – высота калибра);
- D_* – катающий диаметр, то есть диаметр внутри калибра, окружная скорость на котором совпадает со скоростью выхода полосы из клетки ($D_* = D_0 - \frac{\omega_1}{B_1}$, где ω_1 и B_1 – соответственно площадь сечения и ширина полосы);
- S – межвалковый зазор ($S = (0,1 \dots 0,2) \times H_1$);
- B_k – ширина калибра;
- δ_1 – степень заполнения калибра ($\delta_1 = \frac{B_1}{B_k}$);
- $\text{tg } \varphi$ – выпуск ящичного калибра;
- H_0 и B_0 – соответственно высота и ширина заготовки;
- a_1 – соотношение осей полосы;
- a_k – отношение осей калибра ($a_k = a_1 / \delta_1$);
- $\frac{1}{\eta}$ – коэффициент высотной деформации ($\frac{1}{\eta} = \frac{H_0}{H_1}$);
- A_1 – относительный диаметр валка ($A_1 = \frac{D_0 - H_1}{H_1}$);
- m – коэффициент формы очага ($m = \frac{l}{H} = \frac{2 \sqrt{\frac{A_1}{2} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)}}{1/\eta + 1}$);
- α – угол захвата ($\alpha = 2 \arcsin \sqrt{\frac{1/\eta - 1}{2A_1}}$);

- V_* – скорость прокатки ($V_* = \frac{\pi D_* n}{60}$, где n – частота вращения валков, 1/мин);

- $\lambda_{\Sigma \max}$ – вытяжная способность калибров, то есть суммарный коэффициент вытяжки при прокатке в двух смежных калибрах, максимальный по условиям захвата и устойчивости ($\lambda_{\Sigma \max} = \lambda_1 \lambda_2$, где λ_1 и λ_2 – коэффициенты вытяжки соответственно при прокатке не равноосной полосы в равноосном калибре и при прокатке равноосной полосы в неравноосном калибре).

При сортовой прокатке чаще остальных используются следующие системы калибров:

- в ящичных калибрах;
- квадрат – прямоугольник – квадрат;
- квадрат – овал – квадрат;
- квадрат – овал – круг;
- круг – овал – круг;
- квадрат – ромб – квадрат;
- квадрат – шестигранник – квадрат;
- квадрат – плоский овал – круг;
- ребровой овал – овал – ребровой овал;
- круг – гладкая бочка – круг;
- квадрат – прямоугольник – квадрат (на гладких бочках).

К энергосиловым параметрам прокатки относятся усилие прокатки, момент прокатки и мощность.

Усилие прокатки $P = p \cdot F$, где p – среднее давление металла на валки, F – площадь проекции контактной поверхности.

Среднее давление металла на валки рассчитывается по формуле $p = 1,15 \sigma_s n_\sigma$, где n_σ – коэффициент напряженного состояния. Коэффициент напряженного состояния является справочной величиной и определяется для каждой схемы прокатки отдельно [4]. Например, для схемы прокатки квадрат – овал

$$n_\sigma = \left(m + \frac{83}{m+8} - 8,9 \right) \left(0,8 + \frac{0,8}{a_k} \right) (0,61 + 0,39\varphi),$$

где φ – коэффициент трения по Зиббелю (при горячей прокатке стали рекомендуется принимать равным 0,8). Для схемы овал-квадрат

$$n_\sigma = \left(m + \frac{10}{m+2} - 2,28 \right) (0,138 + 0,902\delta_0) (0,8 + 0,25\varphi),$$

где δ_0 – степень заполнения калибра, в котором прокатана заготовка (овал).

Аналогичные формулы получены для всех схем прокатки для перечисленных систем калибров.

Сопротивление деформации σ_s определяется для горячей деформации, например, методом термомеханических коэффициентов $\sigma_s = \sigma_0 K_\varepsilon K_u K_t$.

Степень деформации также представлена в литературе для каждой схемы прокатки, например для схемы квадрат – овал $\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0}$, для схемы овал-квадрат $\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0} (1,16 - 0,2\delta_1)$.

Скорость деформации при прокатке по всем схемам

$$u = 0,105 n_t \sqrt{\varepsilon \frac{D_*}{2H_0}}.$$

Поскольку за время прохода и в паузах, особенно при непрерывной прокатке, температура меняется незначительно, то можно n_t (табличная величина) определять при исходной температуре.

Разработаны формулы и для оценки площади контактной поверхности, например для схемы квадрат – овал площадь контактной поверхности определяется по формуле

$$F = H_1^2 \frac{1}{\eta^2} \xi \sqrt{\eta(A_1 + 1) - 0,75},$$

$$\text{где } \xi = \frac{0,71\delta_1 + 0,29}{(1/\eta)^2} \left[0,28 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^2 + (0,375a_k + 0,845) \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) + 0,09a_k + 0,213 \right].$$

Крутящий момент, приложенный к двум валкам, при прокатке рассчитывается по формуле

$$M = 0,287 \sigma_s H_1^3 A_1^2 n_{\text{вал}},$$

где $n_{\text{вал}}$ – коэффициент крутящего момента деформации, определяемый по формулам, полученным для каждой схемы прокатки. Например, для схемы квадрат – овал

$$n_{\text{вал}} = \lambda(\lambda - 1) \left(\frac{9}{A + 10} \right) \left(1,36 - \frac{0,36}{\psi} \right),$$

а для схемы овал – квадрат

$$n_{\text{вал}} = \lambda^2(\lambda - 1) \left(0,01 + \frac{2,3}{A_1 + 5} \right) \left(1,2 - \frac{0,16}{\psi} \right).$$

Коэффициенты вытяжки λ для рассматриваемого прохода также приведены в литературных источниках, например для схемы овал – квадрат

$$\lambda = 1 + \left[0,597 + \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^{1,59} \right] \left(0,634 + \frac{1,211}{\sqrt{A_1}} \right) \cdot \left(0,27 + \frac{4,648}{a_0^2} \right) (2,023 - 1,137\delta_0)(1,28 - 0,35\psi),$$

где a_0 – отношение осей заготовки (овал).

Мощность прокатки рассчитывается по формуле $N = M \cdot \omega$, где $\omega = 2\pi n$ – угловая скорость вращения валков.

Сравнение усилия и крутящих моментов при прокатке по схемам равноосное – неравноосное – равноосное сечение осуществляется при одинаковых значениях суммарного коэффициента вытяжки λ_Σ , площадей меньшего равноосного сечения и начального диаметра валков.

Для относительного сравнения системы калибров по затратам энергии на прокатку равновеликих по площади сечения профилей определяется отношение $Q_m = \frac{M_{\Sigma 1}}{M_{\Sigma 2}}$, где $M_{\Sigma 1}$ – суммарный крутящий момент при прокатке по рассматриваемой системе калибров, $M_{\Sigma 2}$ – суммарный крутящий момент при прокатке по системе калибров овал – квадрат. Сравнение систем калибров по энергозатратам приведены ниже:

| | |
|---|-------|
| прямоугольник – квадрат (на гладкой бочке)..... | 0,834 |
| овал – квадрат..... | 1,000 |
| овал – ребровой овал..... | 1,000 |
| квадрат – плоский овал – круг..... | 1,082 |
| шестиугольник – квадрат..... | 1,117 |
| прямоугольник – квадрат (в ящичных калибрах)... | 1,195 |
| ромб – квадрат..... | 1,212 |
| овал – круг..... | 1,222 |
| круг – гладкая бочка – круг..... | 1,581 |
| ребровой овал – овал – квадрат..... | 0,976 |
| ребровой овал – овал – круг..... | 0,933 |
| квадрат – овал – ребровой овал..... | 0,998 |
| квадрат – овал – круг..... | 1,000 |
| квадрат – гладкая бочка – ящичный квадрат..... | 1,006 |
| круг – овал – ребровой овал..... | 1,215 |
| круг – овал – квадрат..... | 1,237 |

Наименьшее значение суммарного крутящего момента, а следовательно, и затрат энергии получается при прокатке на гладкой бочке по схеме квадрат – прямоугольник – квадрат ($Q_m = 0,834$). При про-

чих равных условиях затраты энергии при прокатке в калибрах всегда больше по сравнению с прокаткой на гладкой бочке равновеликого по площади сечения квадрата. Это объясняется влиянием на крутящий момент дополнительных контактных сил трения при прокатке в калибрах и наличием в очаге деформации внеконтактных зон, на деформацию которых также затрачивается энергия, подводимая валками.

Сравнение систем калибров по среднестатистической величине Q_p приведено ниже:

| | |
|---|-------|
| прямоугольник – квадрат (на гладкой бочке)..... | 0,807 |
| ромб – квадрат..... | 0,967 |
| овал – квадрат..... | 1,000 |
| овал – ребровой овал..... | 1,088 |
| овал – круг..... | 1,091 |
| квадрат – плоский овал – круг..... | 1,128 |
| шестиугольник – квадрат..... | 1,146 |
| прямоугольник – квадрат (в ящичных калибрах)..... | 1,340 |
| круг – гладкая бочка – круг..... | 1,836 |

Для рационального использования возможностей стана по энергосиловым параметрам необходимо применять наиболее экономичные по энергосиловым параметрам системы калибров и стремиться к возможно большей степени загрузки основного оборудования и электродвигателей привода рабочих клетей. При этом рекомендуется сравнивать различные системы калибров по суммарному крутящему моменту деформации.

1.10. Расчет энергосиловых параметров и энергосбережение при прессовании

В соответствии с видом взаимного перемещения прессуемой заготовки и контейнера прессование подразделяется на прямое (рис. 1.11), обратное (рис. 1.12), с боковым истечением (рис. 1.13), с активным действием сил трения. Наиболее распространено прессование с прямым истечением.

Металл заготовки, помещенный в контейнер, под действием силы прессования P , приложенной со стороны пресс-штемпеля и пресс-шайбы, выдавливается через матрицу (при прессовании сплошных

профилей) или в зазор между каналом матрицы и оправкой (при прессовании полых профилей). При этом металл, заполняя контейнер, смещается относительно него и на стенках контейнера действуют большие силы трения.

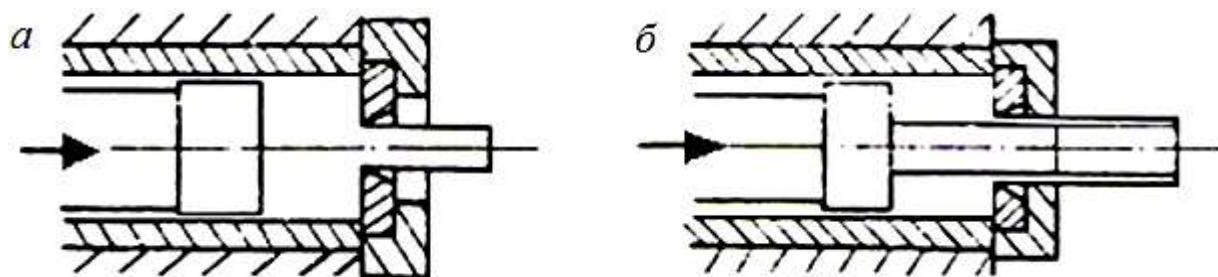


Рис. 1.11. Схемы прямого прессования: *a* – прессование сплошного профиля; *б* – прессование полого профиля

В прессах обратного прессования может двигаться пресс-штемпель или сам контейнер навстречу пресс-штемпелю. И в том и в другом случае прессизделие в процессе выпрессовки движется в направлении обратном направлению движения пресс-штемпеля относительно контейнера. Основной особенностью обратного прессования является отсутствие смещения заготовки относительно контейнера и, следовательно, отсутствие сил трения на его стенках.

Процесс прессования с боковым истечением отличается лишь направлением истечения металла под углом (обычно на 90°). Такое истечение обеспечивает удобство приема пресс-изделия.

Этот способ при определенной прессовой инструментальной наладке может быть использован для получения полых профилей. Прессование с боковым истечением широко применяется при изготовлении биметаллической проволоки (сталь в алюминиевой плакировке). Стальная проволока протягивается через контейнер и опрессовывается алюминием. При прессовании (как правило, прямом) с активным действием сил трения контейнер с индивидуальным гидроприводом перемещается в направлении прессования. Трение на контакте со стенками меняет знак и способствует выпрессовке, снижая усилие прессования и разгружая главный привод пресса.

К энергосиловым параметрам прессования относятся сила прессования P и работа прессования A .

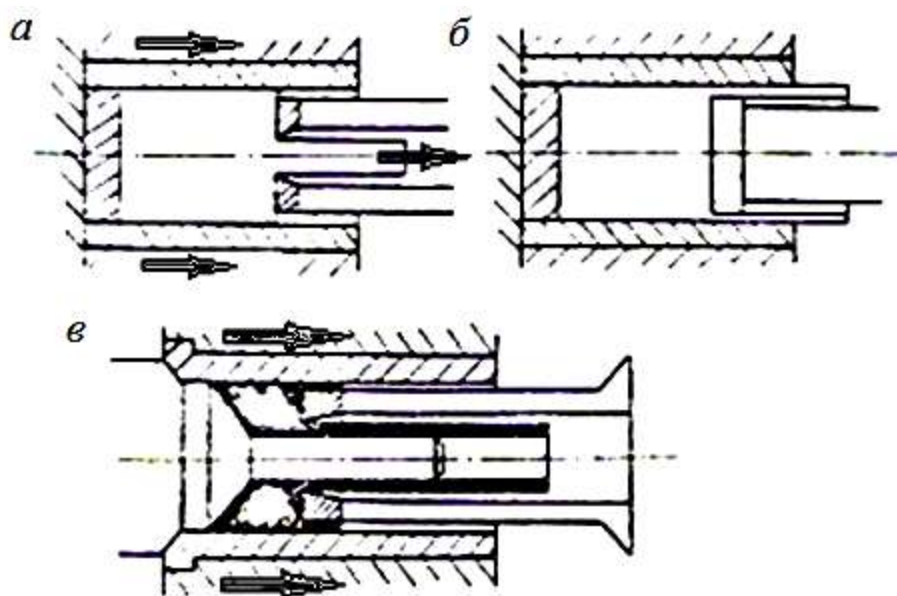


Рис. 1.12. Схемы прессования с обратным истечением:
а – прессование сплошного профиля; *б* – прессование гильзы;
в – прессование полого профиля

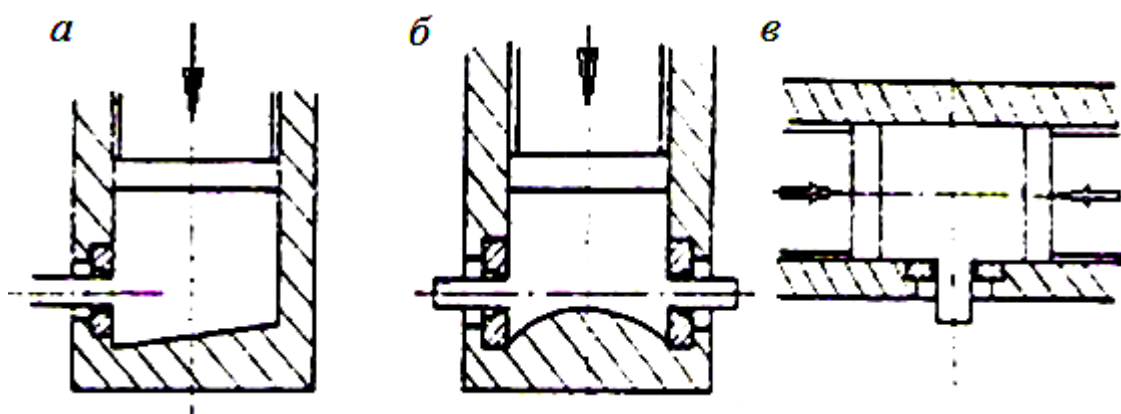


Рис. 1.13. Схемы прессования с боковым истечением:
а – прессование с односторонним истечением; *б* – прессование с двухсторонним истечением; *в* – прессование двумя пуансонами

Наиболее универсальной методикой расчета энергосиловых параметров прессования является методика И. Л. Перлина, в которой используется принцип суперпозиции: сила прессования P является суммой составляющих, каждая из которых учитывает расход мощности на преодоление реактивных сил в определенном месте очага деформации [3]:

$$P = R_m + T_{кр} + T_m + T_{п} ,$$

где R_m – составляющая усилия на преодоление мощности внутренних сил (на собственно деформацию); $T_{кр}$ – составляющая усилия на преодоление напряжений трения на стенках контейнера; T_m – состав-

ляющая усилия на преодоление напряжений трения на поверхности матрицы или напряжений среза мертвой зоны; T_{Π} – составляющая усилия на преодоление напряжений трения на калибрующем пояске матрицы.

В формулу могут быть включены и другие слагаемые, учитывающие иные энергозатраты, например на преодоление противодействия, напряжений трения на поверхности прессшайбы и др. Следует отметить, что формулы были получены при использовании условия текучести Треска, при использовании условия текучести Мизеса коэффициенты в формулах могут оказаться несколько иными. Слагаемые формулы И. Л. Перлина в зависимости от конфигурации очага деформации находятся следующим образом.

При прессовании круглого прутка из круглой заготовки:

$$R_m = 0,8D_k^2 \sigma_{ср} i / \cos^2(\alpha/2),$$

где D_k – диаметр контейнера; $\sigma_{ср}$ – средняя степень деформации; i – логарифмическая степень деформации ($i = \ln \lambda$); α – угол обжимающей части пластической зоны;

$$T_{кр} = 0,5\pi\psi_k D_k \sigma_{s0} L,$$

где ψ_k – коэффициент трения на контейнере; σ_{s0} – начальная степень деформации; L – длина распрессованного слитка за вычетом длины жесткой зоны ($L = L_{ср} - 0,5(D_k - d) / \operatorname{tg} \alpha$, здесь $L_{ср} = D^2 L_c / D_k^2$; d – диаметр прессизделия; D – диаметр слитка; L_c – длина слитка).

$$T_m = 0,4\psi_m D_k^2 \sigma_{ср} i / \cos \alpha,$$

где ψ_m – коэффициент трения на матрице (между мертвой зоной и зоной течения);

$$T_{\Pi} = 0,5\psi_{\Pi} d \sigma_{ск} \lambda l_{\Pi},$$

где ψ_{Π} – коэффициент трения на пояске матрицы; l_{Π} – длина пояска матрицы; $\sigma_{ск}$ – конечная степень деформации.

Угол обжимающей части пластической зоны равен углу естественного истечения металла (60–65°) при полуугле образующей матрицы больше 60–65°, в том числе при плоской матрице, и равен полууглу наклона образующей матрицы к оси прессования, если последний полуугол меньше угла естественного истечения.

Коэффициенты трения ψ_k , ψ_m и ψ_{Π} соответственно на контейнере, на матрице и на калибрующем пояске являются справочными данными и приведены в табл. 1.

Особую трудность вызывает определение величины сопротивления деформации, поскольку кривые упрочнения при сверхвысоких

значениях степени деформации, характерных для прессования, до сих пор не достроены из-за отсутствия соответствующих методик.

В связи с этим пользуются имеющимися зависимостями величины сопротивления деформации $\sigma_s = f(\varepsilon, \xi, \Theta)$, где ξ – скорость деформации, Θ – температура, экстраполируя данные в область высоких степеней деформации.

Таблица 1

Значения коэффициентов трения по Зиббелю для различных случаев прессования

| Условия прессования | Коэффициенты трения | | |
|--|---------------------|----------|----------|
| | ψ_k | ψ_m | ψ_n |
| Со смазкой | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| Без смазки при мягкой окалине (медь) | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Без смазки при жесткой окалине (сталь) | 0,75 | 0,75 | 0,5 |
| Без смазки при интенсивной приварке (алюминий) | 1,0 | 1,0 | 0,5 |

Температурно-скоростные параметры процесса назначают, применяя результаты расчета энергосиловых параметров и тепловых полей с учетом прочности и пластичности металла, а большей частью используя рекомендации, полученные в практике прессования. Указанные скорости не приводят к перегреву металла из-за выделения тепла деформации и в то же время к захлаживанию слитка промышленных размеров и массы.

Скорость деформации при прессовании прутка может быть определена по упрощенной формуле

$$\xi = \frac{2V}{D-d} \frac{\lambda-1}{\operatorname{tg} \alpha},$$

где V – скорость прессования; D – диаметр контейнера; d – диаметр прессизделия; α – угол матрицы или угол откоса матрицы ($\alpha = 60^\circ$).

Величина σ_s является переменной в объеме очага деформации: на входе в него металл не упрочнен и его σ_s не велико, а на выходе из отверстия матрицы металл уже получил деформационное и скоростное упрочнение и поэтому его сопротивление деформации σ_{sk} больше. Последнюю формулу можно определить (с небольшой точностью) по аппроксимирующей формуле

$$\sigma_{sk} = \frac{a\varepsilon^m u^n}{\exp(qt)},$$

где a, m, n, q – эмпирические коэффициенты, значения которых зависят от вида деформируемого материала (для некоторых материалов значения этих коэффициентов представлены в табл. 2), ε, u, t – степень деформации, скорость деформации и температура процесса.

Среднее по очагу сопротивление деформации рассчитывается по формуле

$$\sigma_s = \sigma_{sk} / (1 + m).$$

Скорость деформации пропорциональна скорости перемещения пуансона, поэтому при больших скоростях прессования следует ожидать более высоких напряжений и усилий, чем при низких скоростях. Таким образом, прессование с высокими скоростями приводит к более высоким затратам энергии, чем прессование с низкими скоростями.

Таблица 2

Коэффициенты уравнения регрессии для расчета сопротивления деформации

| Металл и сплав | Диапазон температур, °С | a , МПа | m | n | q , 1/град |
|----------------|-------------------------|-----------|------|------|--------------|
| Свинец | 20–300 | 46 | 0,35 | 0,12 | 0,0015 |
| Алюминий | 300–550 | 180 | 0,37 | 0,14 | 0,0017 |
| Медь | 450–1000 | 520 | 0,40 | 0,11 | 0,0023 |
| Цинк | 20–100 | 420 | 0,15 | 0,13 | 0,0012 |
| Титан | 200–750 | 1900 | 0,35 | 0,10 | 0,0030 |
| Сталь Ст3 | 900–1300 | 1250 | 0,25 | 0,14 | 0,0025 |

Однако поддерживать высокие скорости прессования заставляют технолога требования по обеспечению высокой производительности, а также опасность захлаживания металла, в результате чего энергозатраты могут возрасти. Вместе с тем при чрезмерно высокой скорости прессования выделение большого количества тепла деформации может привести к перегреву металла или даже к его расплавлению. В связи с этим в каждом конкретном случае выбор скорости деформации является предметом забот технолога.

$$\text{Степень деформации } \varepsilon = \frac{\lambda - 1}{\lambda}.$$

Изменение температуры заготовки во время прессования можно оценить по формуле

$$\Delta t = \frac{0,9 \sigma_{scp} \ln \lambda}{c p},$$

где σ_{scp} – среднее сопротивление деформации, МПа; c – средняя теп-

лостность металла заготовки, Дж/(кг·°К); p – плотность, кг/м³.

Работа прессования оценивается по формуле

$$A = \int_0^{L_{\text{п}}} P(x) dx ,$$

где $P(x)$ – усилие прессования, изменяющееся по длине хода пресс-штемпеля; $L_{\text{п}}$ – длина отпрессованной части слитка, отличающаяся от длины слитка на величину длины прессостатка, которая может достигать четверти длины слитка.

Обычно известные формулы, применяемые для определения усилия прессования, используются для оценки номинального усилия пресса, необходимого для получения данного вида продукции, поэтому определяется максимальное усилие прессования. Однако в ходе процесса прямого прессования усилие изменяется, так как уменьшается площадь поверхности трения в контейнере.

Для нахождения удельной работы прессования A_m разделим правую и левую части формулы на массу слитка m и учтем коэффициент полезного действия $\eta_{\text{п}}$. Тогда получим

$$A_m = \frac{A}{m \eta_{\text{п}}} = \frac{\int_0^L P(x) dx}{p F \eta_{\text{п}}} ,$$

где F – площадь поперечного сечения контейнера.

При обратном прессовании усилие по ходу процесса практически не изменяется, поэтому формула может быть записана в более простом виде

$$A_m = \frac{P}{p F \eta_{\text{п}}} .$$

В целом энергозатраты на прессование Q можно оценить, используя принцип суперпозиции:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n ,$$

где Q_1 – энергия, необходимая для нагрева заготовки; Q_2 – энергия, необходимая для совершения работы сдвиговой деформации A , в том числе на совершение работы собственно деформации, преодоление сил трения на контактных поверхностях и на срезе; Q_3 – энергия, необходимая для совершения дополнительной работы, например натяжения заготовки на выходе из отверстия матрицы или приложения усилий подпора; Q_4 – энергия, необходимая на совершение упругой

деформации заготовки; Q_5 – энергия, необходимая для пластического уплотнения металла заготовки при наличии исходной пористости; Q_6 – энергия, необходимая для преодоления потерь при ее передачи от источника до пресса.

Энергоемкость собственно прессования при использовании нагретой заготовки окажется, естественно, ниже, чем при использовании холодной заготовки, из-за понижения сопротивления деформации. Однако такой однозначный вывод нельзя сделать, если рассматривать совокупность процессов нагрева заготовки и прессования.

Энергоемкость нагрева зависит от теплофизических характеристик материала, разницы температур, массы заготовки и степени эффективности нагрева, оцениваемой коэффициентом полезного действия этого процесса η .

Количество тепла, необходимого для нагрева заготовки массой m из материала с удельной теплоемкостью c от температуры t_2 до температуру t_1 :

$$Q = m c (t_1 - t_2) .$$

Поскольку реальные процессы нагрева осуществляются с потерями тепла на нагрев футеровки печей, печной арматуры, окружающего воздуха, то количество тепла Q , реально необходимого на нагрев, следует рассчитывать с учетом коэффициента полезного действия нагревательного устройства η . Аналогично при определении энергии, затраченной на прессование: следует учесть с помощью коэффициента полезного действия процесса прессования $\eta_{\text{п}}$ потери энергии на упругое сжатие жидкости высокого давления, потери на гидравлическое сопротивление и трение в узлах пресса.

Для нахождения удельной энергии q , требующейся на нагрев и обработку давлением продукции единичной массы, произведем сложение величин Q и A с учетом их КПД и результат разделим на массу m , в результате чего получим сумму удельных затрат соответственно q_1 и q_2 :

$$q = q_1 + q_2 = \frac{1}{m} \left(\frac{Q}{\eta} + \frac{A}{\eta_{\text{п}}} \right) = \frac{c(t_1 - t_2)}{\eta} + \frac{F}{m \eta_{\text{п}}} \int_0^{L_{\text{п}}} p(x) dx ,$$

где $p(x)$ – напряжение прессования ($p(x) = P(x)/F$), где F – площадь сечения контейнера).

В качестве примера на рис. 1.14 приведена зависимость энергозатрат от температуры прессования.

Следует отметить, что при сравнении двух процессов одинаковый уровень энергозатрат совершенно не предполагает равенства затрат на энергоресурсы, поскольку различна стоимость различных видов энергии (электрическая, тепловая, полученная сжиганием топлива). Электрическую энергию принято считать наиболее дорогим видом энергии, но этот же вид часто используется с наибольшей эффективностью (с наиболее высоким КПД). При прессовании цветных металлов и сплавов наиболее часто используется электроэнергия как для привода прессов (механических и гидравлических), так и для нагрева заготовок (индукционный, сопротивлением). В этом случае предпринятая в формуле операция сложения однородных величин оправдана.

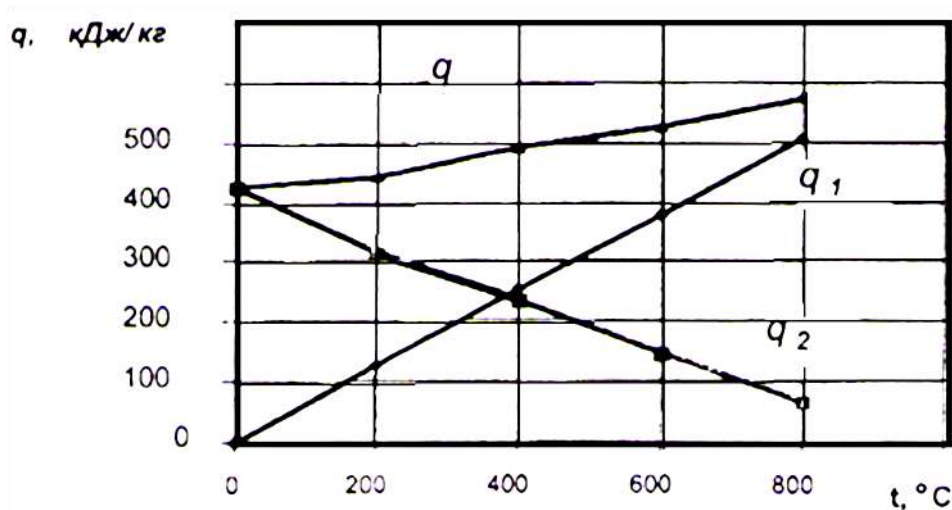


Рис. 1.14. Зависимость удельных энергозатрат нагрева q_1 , прессования q_2 и суммарных энергозатрат q от температуры при обработке алюминия ($\lambda = 20$)

1.11. Расчет энергосиловых параметров и энергосбережение при волочении

Величина силы волочения P_v имеет чрезвычайно большие значения в процессе волочения. Чем меньше величина P_v , тем меньше и напряжение волочения p_v , следовательно, тем меньше опасность обрыва, ниже расход энергии на процесс деформации, меньше контактные напряжения и, как следствие, меньше износ волок.

На величину силы волочения влияет материал, из которого изготовлена волока, геометрия и качество обработки канала волоки. Установлено, что сила волочения в начале работы с новой волокой постепенно уменьшается, а потом с увеличением срока эксплуатации

растет. Уменьшение силы волочения в начале эксплуатации объясняется тем, что поверхность волоки полируется протягиваемой проволокой. Увеличение же силы волочения объясняется появлением колец и других дефектов канала волоки, обусловленных износом. Наименьшая сила волочения наблюдается при волочении через алмазные волоки. Далее по силе волочения идут твердосплавные волоки и стальные.

На величину напряжения волочения оказывают влияние различные факторы. К основным факторам относятся: степень деформации за проход, прочностные свойства протягиваемого металла, геометрия канала волоки, трение на контакте, форма сечения изделия до и после протяжки, противонатяжение, вибрация инструмента и др.

Напряжение волочения $p_v = P_v/F_1$ (где F_1 – площадь поперечного сечения профиля на выходе из волоки) должно быть меньше сопротивления деформации в состоянии после волочения σ_{s1} . В противном случае пластическая деформация может происходить и после выхода металла из волоки, отчего будет искажаться геометрия поперечного сечения изделия, и в конечном счете может произойти обрыв. Поэтому при волочении обязательно должно соблюдаться условие

$K_3 = \sigma_{s1}/p_v \geq [K_3]$, где K_3 – коэффициент запаса. На практике величина коэффициента запаса изменяется в довольно широких пределах $K_3 = 1,35–2,5$, а в отдельных случаях увеличивается до 2,5. При этом чем тоньше изделие и чем выше требования качества, тем больше K_3 . Поэтому максимальный коэффициент запаса, как правило, в последних проходах.

Сила и напряжение волочения растут при увеличении степени деформации $\varepsilon = 2\ln(d_0/d_1)$, где d_0 и d_1 – диаметры проволоки до и после волочения. Также сила и напряжение волочения растут при увеличении коэффициента трения, угла волоки. О влиянии скорости волочения на силу волочения имеется множество противоречивых сведений. Однако большинство авторов придерживается мнения, что P_v растет при очень малых скоростях (менее 6 м/мин), затем убывает (до 400–900 м/мин), а затем снова возрастает.

Наибольшее распространение нашли формулы для расчета силы волочения, решенные либо инженерным методом, либо методом мощностей. Расчетные методы охватывают практически все известные способы волочения, которые можно классифицировать следующим образом:

- волочение сплошных круглых профилей;

– волочение сплошных профилей правильной многоугольной формы;

– волочение сплошных профилей прямоугольного сечения;

– волочение профилей, близких к прямоугольным;

– волочение сплошных фасонных профилей;

– безоправочное волочение труб и полых профилей;

– волочение труб на неподвижной оправке;

– волочение труб на самоустанавливающейся оправке;

– волочение труб и полых профилей на деформируемом сердечнике;

– волочение труб раздачей;

– профилирование труб и полых профилей.

Инженерным методом при допущении равенства продольных напряжений на перпендикулярных оси волочения сечениях без учета реальной кривой упрочнения получены формулы для сплошных круглых профилей [5]:

– формула Гавриленко

$$P_B = \sigma_{\text{вср}}(F_0 - F_1) \left(1 + \frac{f}{\text{tg } \alpha}\right),$$

где $\sigma_{\text{вср}}$ – средний по очагу деформации предел прочности протягиваемого материала; F_0 и F_1 – площади поперечных сечений изделия до и после волочения; α – полуугол рабочего конуса волоки; f – коэффициент трения;

– формула Перлина – Заруева

$$P_B = F_1 \sigma_{\text{ср}} \varepsilon \left(1 + \frac{f}{\text{tg } \alpha'}\right),$$

где $\sigma_{\text{ср}}$ – среднее значение сопротивления деформации металла, ε – степень деформации; α' – приведенный угол рабочей зоны, при котором в длину обжимающего конуса условно включена длина калибрующей зоны волоки ($\text{tg } \alpha' = \frac{(d_0 - d_1) \text{tg } \alpha}{d_0 - d_1 + 2l_k \text{tg } \alpha}$, где l_k – длина калибрующей зоны волоки).

Задача, решенная интегральным методом мощностей с использованием гипотезы плоских сечений и при аппроксимации кривой упрочнения выражением $\sigma_s = \sigma_{s0} + m\varepsilon^n$, где n и m – коэффициенты аппроксимации, а $\varepsilon = 2\ln(d_0/d_1)$ – логарифмическая степень деформации, дает следующий результат для напряжения волочения сплошных круглых профилей (прутков, проволоки):

$$P_B = \frac{\sigma_{s0}}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{3} \varepsilon \frac{m+k}{m+1} + \frac{2}{3} a(k+1) + \psi \varepsilon \frac{1+a^2}{a} \right],$$

где σ_{s0} – сопротивление деформации металла на входе в волоку; $k = \frac{\sigma_{s1}}{\sigma_{s0}}$ – коэффициент упрочнения, (здесь σ_{s1} – сопротивление деформации металла на выходе из волоки); $a = \operatorname{tg} \alpha$; ψ – коэффициент трения по Зиббелю ($0 \leq \psi \leq 1$).

При проведении технологических расчетов часто используются упрощенные формулы:

– формула Красильщикова

$$P_B = 0,6 d_{cp}^2 \sqrt{\varepsilon} \sigma_{всп};$$

– формула Ландихова

$$P_B = 1,8(F_0 - F_1) \frac{F_1}{F_0} \sigma_{всп}.$$

Аналогичные формулы выведены для волочения труб:

– при безоправочном волочении

$$P_B = 1,2 \sigma_{всп} \frac{\operatorname{tg} \alpha + f}{(1 - f \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} \alpha} F_1 \frac{F_0 - F_1}{F_0};$$

– при волочении на закрепленной и плавающей оправках

$$P_B = 1,05 \sigma_{всп} F_1 \frac{F_0 - F_1}{F_0} \left[\frac{\operatorname{tg} \alpha + f}{(1 - f \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} \alpha} + \frac{d_1}{d_{1cp}} \cdot \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha} \right],$$

где d_1 – внутренний диаметр трубы после волочения; d_{1cp} – средний диаметр трубы после волочения; f – коэффициент трения по Кулону;

$$P_B = 1,75 \sigma_{всп} F_1 \frac{F_0 - F_1}{F_0} \left[\frac{\operatorname{tg} \alpha + f}{(1 - f \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} \alpha} - \frac{d_1}{d_{1cp}} \cdot \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha} \right].$$

Противонатяжение, несмотря на увеличение силы и напряжения волочения, эффективно, так как снижает контактные напряжения в очаге деформации, реакцию опоры волоки, разогрев проволоки в очаге, уровень остаточных напряжений. При волочении с противонатяжением легче реализуется гидродинамический режим трения, так как снижается давление смазки на входе в зону обжатия, при котором смазка разделяет контактирующие поверхности.

Существует большое количество формул расчета силы или напряжения волочения, учитывающих влияние противонатяжения. Эти формулы либо сложны, либо дают значительные погрешности при малых обжатиях и при высоких значениях относительного напряжения противонатяжения $S_0 = q_0 / \sigma_{s0}$, где $q_0 = Q / F_0$ – напряжение противонатяжения; Q – сила противонатяжения. Удобно для учета влияния противонатяжения на напряжение волочения использовать гра-

фик, предложенный в свое время Бюлером и позволяющий определять напряжение волочения с противонатяжением $p_{\text{ВН}}$ при известном $p_{\text{В}}$ и заданном S_0 (рис. 1.15).

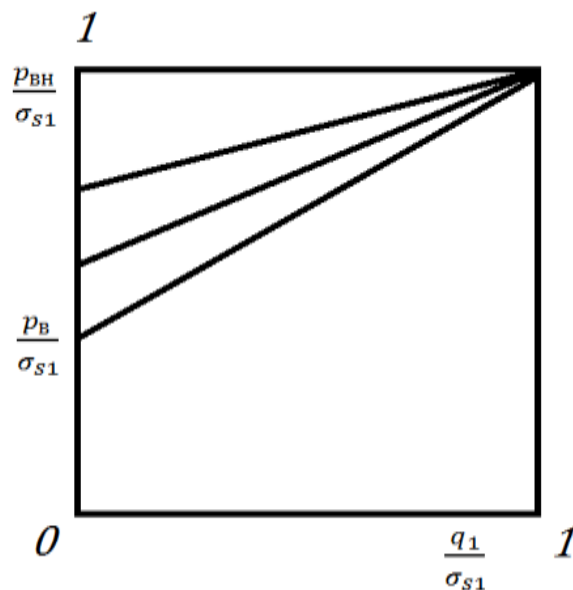


Рис. 1.15. Влияние противонатяжения на напряжение волочения по Бюлеру

На представленном графике через q_1 обозначено напряжение противонатяжения, приведенное к площади поперечного сечения конечного изделия. Через σ_{s1} обозначено сопротивление металла деформации после волочения. Из линейного графика зависимости $p_{\text{ВН}}/\sigma_{s1}$ от q_1/σ_{s1} следует отношение

$$\frac{p_{\text{ВН}}}{\sigma_{s1}} = \frac{p_{\text{В}}}{\sigma_{s1}} + \left(1 - \frac{p_{\text{В}}}{\sigma_{s1}}\right) \frac{q_1}{\sigma_{s1}} = \frac{p_{\text{В}}}{\sigma_{s1}} \left(1 - \frac{q_0}{\sigma_{s0}} \frac{\lambda}{k}\right),$$

где $\lambda = F_0/F_1$ – коэффициент вытяжки, $k = \sigma_{s1}/\sigma_{s0}$ – коэффициент упрочнения.

Отсюда напряжение волочения с противонатяжением

$$p_{\text{ВН}} = p_{\text{В}} \left(1 - S_0 \frac{\lambda}{k}\right) + S_0 \sigma_{s0} \lambda.$$

Характер действия противонатяжения при волочении труб аналогичен волочению сплошных профилей. Экспериментальными исследованиями процесса волочения труб без оправки установлено, что противонатяжение увеличивает напряжение тем больше, чем меньше коэффициент трения и величина деформации и больше противонатяжение.

Энергетическую эффективность процессов волочения оценивают по мощности волочения $N = P_{\text{В}} V_1$, где V_1 – скорость изделия на выходе из волоки, называемая скоростью волочения.

Понятно, что снизить мощность волочения можно за счет снижения силы волочения, что не приведет к потере производительности. При выборе угла волоки α следует учитывать существование оптимального угла $\alpha_{\text{оп}}$, при котором сила волочения минимальна при прочих равных условиях волочения. Оптимальный угол определяется из уравнения $\frac{\partial P_{\text{в}}}{\partial \alpha} = 0$. Например, переходя от формулы для определения напряжения волочения для сплошных круглых профилей можно найти оптимальный угол:

$$\alpha_{\text{оп}} = \arctg \sqrt{\frac{\psi \varepsilon}{\frac{2}{3}(k+1) + \psi \varepsilon}}.$$

Для оценки энергопотребления при волочении используют удельное значение работы деформации:

$$A_m = \frac{P_{\text{в}} L}{\rho V \eta},$$

где L – длина протянутого изделия; ρ – плотность металла; V – объем изделия длиной L ; η – коэффициент полезного действия волочильной машины.

Энергозатраты при волочении находятся в тесной зависимости от коэффициента трения. Именно поэтому на предприятиях получило широкое распространение волочение в режиме гидродинамического трения (РГТ). Значительное снижение силы волочения при РГТ наступает при достижении определенной скорости волочения. Энергосиловые расчеты для РГТ выполняют в два этапа: для начального периода (при разгоне стана) и для установившегося режима. Энергозатраты на первом этапе достаточно значительные, однако в силу кратковременности периода в целом их влияние на общий уровень энергозатрат не велико. Расчеты на этом этапе выполняются зачастую для проверки условия прочности переднего конца заготовки. При наступлении установившейся стадии процесса коэффициент трения снижается практически до нуля, и, следовательно, резко снижаются энергозатраты.

Противонатяжение также может рассматриваться как эффективная мера по снижению энергопотребления. Однако эффективность достигается только при непрерывном многопроходном волочении на прямоточных станах и на станах, работающих со скольжением проволоки на барабанах. С ростом противонатяжения снижается суммарная мощность волочения на стане, поскольку уменьшаются потери на трение в волоках. В пределе мощность волочения стремится к

мощности простого растяжения без участия волоки. При проектировании следует учитывать, что противонапряжение снижает значение оптимального угла рабочего конуса волоки.

Энергопотребление снижается при использовании роликовых волок. Чаще всего они применяются либо для производства профилей неответственного назначения, либо для заготовительных и черновых проходов.

1.12. Расчет энергосиловых параметров и энергосбережение при ковке и штамповке

При ковке и штамповке оценка энергопотребления на единицу массы поковок проводится лишь для процессов свободнойковки крупных поковок из слитков наполнительного литья, когда кроме проблем собственно формообразования приходится улучшать структуру металла исходной заготовки и по возможности устранять последствия ликвационной неоднородности. В этом случае ковка ведется с несколькими промежуточными нагревами (выносами). Поэтому общая энергоемкость процесса изготовления крупных поковок в основном определяется затратами на нагрев металла. Чем крупнее слиток, тем больше химическая и структурная неоднородность по сечению и тем больше требуется накопленная степень предварительной деформации. В процессах кузнечно-штамповочного производства (КШП) эту степень деформации упрощенно оценивают степенью уковки (уков), представляющей из себя отношение сечений поковки до и после очередной операции. При этом степень уковки всегда представляется величиной большей единицы. При осадке степень уковки – это отношение площади поперечного сечения осаженой заготовки к площади поперечного сечения слитка до осадки, а при кузнечной вытяжке – наоборот. При многооперационной технологии суммарная степень уковки представляется произведением частных степеней уковки:

$$y_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n y_i ,$$

где y_i – степень частной уковки; n – количество операций свободнойковки в рассматриваемом выносе.

Количество тепла, необходимое для нагрева заготовки при каждом выносе, определяется выражением

$$Q_i = \frac{c m \Delta t_i}{\eta},$$

c – теплоемкость металла заготовки; где m – масса заготовки; Δt_i – температурный интервал подогрева на i -м выносе; η – коэффициент полезного действия нагревательного устройства.

Для слитков степень уковки может достигать 20 и более. Для прокатанных заготовок, чаще всего используемых при штамповке, степень уковки значительно меньше. Она необходима только в тех случаях, когда фактическая степень обжатия слитка в процессе прокатки меньше 2,5–3,0-кратного укова. Для поковок из сталей карбидного класса, для которых требуется размельчение карбидов и их равномерное распределение по сечению, необходима большая степень уковки и чередование операций протяжки и осадки. В частности, для быстрорежущей стали Р18 требуется степень уковки 8–12.

Таким образом, снижение энергопотребления при ковке крупных поковок возможно за счет снижения требуемой степени уковки. Эффективной мерой по снижению энергопотребления следует считать замену слитков наполнительного литья непрерывнолитыми заготовками. Это особенно важно в совершенствовании технологийковки и штамповки высоколегированных цветных сплавов. Степени уковки таких сплавов, как правило, значительно выше, чем для черных металлов (углеродистых и низкоуглеродистых). Термин «степень уковки» для цветных металлов не используется. В технологической документации на ковку поковок из цветных сплавов указывается так называемая схемаковки. Номер схемыковки указывает на необходимое количество спаренных заготовительных операций осадка-протяжка.

При разработке технологийковки и штамповки важна оценка силовых параметров каждой операции, так как от этого зависит рациональный выбор оборудования и оценка прочности и износостойкости кузнечного инструмента.

Технологический процессковки и штамповки, как правило, начинается с заготовительных операций, среди которых применяются те или иные способы разрезки заготовок.

Если при заготовительных операциях используется холодная ломка на прессах, то усилие ломки определяется следующими формулами:

– для круглого профиля

$$P = K \frac{0,4d^3\sigma_B}{L};$$

– для квадратного профиля при ломке по стороне сечения

$$P = K \frac{0,7a(a-h)^2\sigma_B}{L};$$

– для квадратного профиля при ломке по диагонали

$$P = K \frac{0,5a^3\sigma_B}{L},$$

где K – коэффициент, учитывающий характер действия усилия, форму сечения и другие факторы ($K = 0,8-1,1$ при ломке круглого или квадратного профиля по диагонали, $K = 1,05-1,1$ при ломке квадратного профиля по стороне сечения); d – диаметр круглого сечения; L – расстояние между опорами при ломке; a – сторона квадратного сечения; h – глубина надреза.

При гильотинной резке прутковых заготовок на ножницах усилие резания определяется по формуле

$$P = m\tau_s F,$$

где m – коэффициент, учитывающий конфигурацию сечения разрезаемой заготовки ($m = 1$ для заготовок круглого или квадратного сечения при резке по диагонали, $m = 0,9-0,95$ для заготовок профильного сечения); τ_s – сопротивление металла сдвиговой деформации; F – площадь поперечного сечения разрезаемой заготовки.

В случаях, когда ширина разрезаемого металла значительно превышает толщину, для резки обычно применяют наклонные под углом γ ножи. Необходимое усилие резания наклонными ножами

$$P = 0,4\sigma_B \frac{a^3}{tg \gamma},$$

где a – толщина разрезаемой заготовки.

Приведенные формулы для расчета усилий действительны при резке незатупленными ножами и с нормальными зазорами между ними. В противном случае усилие может оказаться существенно выше.

Среди всех операций свободнойковки осадка является наиболее тяжелой и требующей молотовое оборудование с большой массой падающих частей, либо мощное прессовое оборудование. Если осадка осуществляется на молоте, то необходимая масса G , кг, падающих частей молота определяется по формуле

$$G = 0,17 \left(1 + 0,17 \frac{D}{h} \right) \sigma_s \varepsilon V_3,$$

где D и h – соответственно диаметр и высота заготовки после осадки, мм; σ_s – сопротивление металла деформации при температурековки;

ε – относительная деформация за последний удар ($\varepsilon = 0,025$ для крупных поковок и $\varepsilon = 0,060$ для мелких поковок); V_3 – объем заготовки, см^3 .

При прессовой осадке необходимое усилие P , МН, определяется по формуле

$$P = \psi \left(1 + 0,17 \frac{D}{h} \right) \sigma_s F^{-0,6},$$

где ψ – масштабный коэффициент; F – площадь контактной поверхности после осадки, мм^2 .

Значения масштабного коэффициента ψ при осадке слитков на прессе приведены ниже:

| | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|
| масса слитка, т..... | 0,5 | 6,0 | 20 | 50 | 100 |
| ψ | 0,80 | 0,70 | 0,60 | 0,55 | 0,50 |

Кузнечная вытяжка также относится к основным операциям свободнойковки. Если вытяжка выполняется на молоте, то необходимая масса падающих частей молота G , кг, по формуле:

$$G = 1,7v \left(1 + 0,17 \frac{l}{h_0} \right) \sigma_s \varepsilon h_0 b_0 l,$$

где v – коэффициент формы бойков ($v = 1$ для плоских бойков, $v = 1,25$ для вырезных бойков); σ_s – сопротивление металла деформации при температурековки; ε – степень деформации за один удар (обычно $\varepsilon = 0,025$ – $0,035$); h_0 и b_0 – высота и ширина заготовки соответственно, см (при протяжке круглой заготовки в круглых вырезных бойках $h_0 = b_0 = d$, где d – диаметр заготовки); l – величина подачи, см.

При прессовой вытяжке

$$P = v\psi \left(1 + 0,17 \frac{l}{h_0} \right) \sigma_s b_0 l.$$

Операция прошивки на прессе подразделяется на прошивку высоких и низких заготовок. Усилие, необходимое для прошивки высокой заготовки ($H / D > 0,5$) сплошным прошивнем, определяется по формуле

$$P = \frac{\pi d^2}{4} \sigma_v \left(1 + \frac{\mu d}{3h} + \beta \ln \frac{D}{d} \right),$$

где d – диаметр прошивня; μ – коэффициент трения между прошивнем и заготовкой; h – высота выдры; $\beta = 1,15$ – коэффициент Лодэ; D – наружный диаметр заготовки после прошивки.

Прошивка низких заготовок выполняется в подкладном кольце. При прошивке низкой заготовки сплошным прошивком усилие определяется по формуле

$$P = (0,7 - 0,8) \sigma_{\text{в}} \pi h d.$$

Последней основной операцией свободнойковки является скручивание. Усилие, необходимое для кручения цилиндрического участка на угол поворота α рычагом длиной l , определяется по формуле:

$$P = \frac{\pi d^3 \sigma_s}{24 l \cos \alpha \cdot 10},$$

где d – диаметр заготовки в месте скручивания, мм; σ_s – сопротивление металла деформации при температуре кручения, МПа; l – длина плеча рычага, мм; α – угол поворота рычага от горизонтального положения.

При молотовой штамповке круглых в плане поковок в открытых штампах необходимую для штамповки массу падающих частей паровоздушного штамповочного молота G , кг, определяют по формуле:

$$G_0 = 5,6 \cdot 10^{-4} \sigma_s (1 - 0,0005 D_{\text{п}}) \left\{ 3,75 \left(b + \frac{D_{\text{п}}}{4} \right) (75 + 0,001 D_{\text{п}}^2) + D_{\text{п}} \left(\frac{b^2}{2} + \frac{b D_{\text{п}}}{2} + \frac{D_{\text{п}}^2}{50} \right) \ln \left[1 + \frac{2,5(75 + 0,001 D_{\text{п}}^2)}{D_{\text{п}} h_0} \right] \right\},$$

где σ_s – сопротивление металла деформации при температуре штамповки, МПа; $D_{\text{п}}$ – диаметр поковки, мм; b – ширина мостика облойной канавки, мм; h_0 – ширина мостика облойной канавки, мм.

При штамповке некруглых в плане поковок масса падающих частей молота определяется по аналогичной формуле, в которой вместо $D_{\text{п}}$ записывается приведенный диаметр поковки $D_{\text{пр}} = 1,13 \sqrt{F_{\text{п}}}$, где $F_{\text{п}}$ – площадь проекции поковки в плане, мм².

Массу падающих частей молота простого действия можно определить по приведенным формулам, умножив найденное значение на коэффициент перевода:

$$G_{\text{п.м}} = (1,5 - 1,8) G_0.$$

Для определения массы падающих частей молота при штамповке в закрытых штампах можно использовать те же формулы, а значения уменьшить на 20–25 %.

Для упрощенных оценочных расчетов используют формулу

$$G = (3,5 - 5,0) F_{\text{п}},$$

где $F_{\text{п}}$ – площадь проекции поковки в плане вместе с мостиком облойной канавки, см².

Усилие штамповки на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП) определяется по формулам:

– для круглых и квадратных в плане поковок

$$P = \sigma_s \left\{ \left(1,5 + \mu \frac{b}{h_0} \right) F_0 + \left(\frac{2\mu b}{h_0} - 0,375 + 1,25 \ln \frac{d}{h_0} \right) F_{\Pi} \right\};$$

– для удлиненных в плане поковок

$$P = 1,155 \sigma_s \left\{ \left(1,5 + \mu \frac{b}{h_0} \right) F_0 + \left(\frac{2\mu b}{h_0} - 0,25 + 1,25 \ln \frac{a}{h_0} \right) F_{\Pi} \right\},$$

где μ – коэффициент трения на мостике облойной канавки ($\mu=0,5$); b и h_0 – ширина и высота мостика облоя, мм; F_0 – площадь проекции мостика облоя, мм²; d и a – соответственно диаметр поковки и размер поковки по ширине, мм; F_{Π} – площадь проекции поковки в плане, мм².

При штамповке на гидравлических прессах ориентировочное усилие штамповки можно определить по формуле

$$P = F \sigma_s c t u v,$$

где F – площадь проекции поковки в плане вместе с заусенцем, мм²; c – скоростной коэффициент ($c = 1,0 \dots 1,1$); t – коэффициент, учитывающий влияние контактного трения; u – коэффициент, учитывающий схему напряженного состояния; v – коэффициент неравномерности напряженного состояния, который зависит от сложности поковки, определяемой по формуле

$$\psi = \frac{V}{h_{\max} F},$$

где V – объем поковки без учета заготовки; h_{\max} – наибольшая высота заготовки; F – площадь проекции поковки в плане вместе с заусенцем.

Значения коэффициентов ψ и v приведены ниже:

| | | | |
|--------------|----------|-----------|-----------|
| ψ | 1,0–0,75 | 0,74–0,50 | 0,5 |
| v | 1,1–1,43 | 1,32–1,68 | 1,56–0,65 |

Коэффициент t зависит от выполняемой операции:

– при осадке на гладких платах $t = 1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d}{h}$, где d и h – диаметр и высота поковки;

– при ковке на плоских бойках шириной a (подача)
 $t = 1 + \frac{3b-a}{6b} \mu \frac{a}{h}$, где b и h – ширина и высота поковки;

– при ковке в вырезных бойках $m = 1,1 + \mu \frac{\alpha l}{\pi d}$, где α – угол охвата поковки бойком, рад; l – ширина бойка; d – диаметр сечения поковки.

Определение работы деформации при ковке рассматривается на примере осесимметричной осадки. Цилиндр высотой h_0 осаживается до высоты h_k ; исходное сечение цилиндра F_0 . Допускается что $\sigma_s = \text{const}$. Текущее сечение заготовки при высоте h определяется из условия постоянства объема

$$F = F_0 \frac{h_0}{h}.$$

Работа деформации

$$A = \int_{h_k}^{h_0} \sigma_s F_0 \frac{h_0}{h} dh = \sigma_s F_0 h_0 \int_{h_k}^{h_0} \frac{dh}{h} = \sigma_s V_0 \ln \frac{h_0}{h_k} = \sigma_s V_0 \varepsilon.$$

В случае линейного упрочнения

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + a\varepsilon,$$

где $\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} = 1 - \frac{h}{h_0}$, тогда

$$\begin{aligned} A &= \int_{h_k}^{h_0} \left[\sigma_s + a \left(1 - \frac{h}{h_0} \right) \right] F_0 \frac{h_0}{h} dh = \\ &= \left[(\sigma_s + a) h_0 \ln \frac{h_0}{h_k} - a(h_0 - h_k) \right] F_0. \end{aligned}$$

При штамповке на винтовых прессах требуемое усилие ориентировочно определяется по формуле

$$P = a \left(2 + 0,1 \frac{F_{\Pi} \sqrt{F_{\Pi}}}{V_{\Pi}} \right) \sigma_{\text{в}} F_{\Pi},$$

где $a = 3$ при штамповке в закрытых штампах; $a = 4$ при штамповке в открытых штампах; $a = 5$ при штамповке выдавливанием; V_{Π} – объем поковки; F_{Π} – площадь поверхности поковки.

При проектировании техпроцесса штамповки на винтовых прессах целесообразно кроме усилия рассчитывать работу штамповки, что позволит рационально подобрать параметры настройки пресса.

В общем случаековки и штамповки для расчета работы деформации следует определить функцию силыковки от перемещения исполнительного узла кузнечной машины.

1.13. Трение в процессах ОМД и методы его снижения. Смазки.

Внешним или контактным трением называют сопротивление, возникающее при перемещении одного тела относительно другого. Вектор силы трения лежит в плоскости касания тел и направлен в сторону, противоположную действию сдвигающего усилия. В зависимости от величины относительного смещения тел различают силу трения покоя и силу трения движения. Сила трения движения обычно несколько меньше силы трения покоя.

Для характеристики величины силы трения широко используется показатель. Называемый коэффициентом трения, который может быть:

- коэффициентом трения покоя $f_s = T_s / N$, где T_s – сила трения покоя, то есть сила, при которой начинается скольжение тела относительно другого;

- коэффициентом трения скольжения $f_s = T / N$;

- коэффициентом трения качения $K = T \cdot R / N$, где R – радиус катка.

С коэффициентом трения тесно связано понятие угла трения β . Коэффициент трения $f = \operatorname{tg} \beta$.

В некоторых случаях величина силы трения скольжения зависит от направления скольжения. Причиной этого могут быть следы механической обработки, неодинаковый износ трущихся поверхностей в разных направлениях. Такое трение называется анизотропным.

Реальные поверхности деформирующего инструмента волнистые и шероховатые как на микро-, так и на макроуровне. Под волнистостью понимают совокупность неровностей с относительно малым шагом 0,002–12,5 мм и высотой 0,025–1600 мкм. Параметры шероховатости нормированы ГОСТ 2789. Шероховатость измеряется профилографами, профилометрами, микроскопами. Для количественной оценки микрорельефа (шероховатости) стандарт предусматривает определение следующих параметров: R_a – среднее арифметическое отклонение профиля на заданной базе сканирования; R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам; R_{\max} – наибольшая высота поверхностной неровности профиля; S – средний шаг неровностей по вершинам; S_m – средний шаг неровностей; t_p – относительная опорная длина профиля.

Между поверхностями трущихся тел практически всегда находятся различные вещества, свойства которых резко отличаются от свойств основных трущихся тел. Эти вещества называются промежу-

точной или разделительной средой. Таким веществом могут быть окислы, грязь, подсмазочные покрытия, смазки и т. д. В зависимости от количества и толщины промежуточного слоя различают три вида трения: сухое (ювенильное), граничное и жидкостное. Выделяют иногда и смешанные виды трения: полусухое и полужидкостное.

Сухое трение наблюдается, когда поверхности трущихся тел совершенно свободны от смазки, загрязнений и молекул других веществ (влаги, газов и др.). Идеальное ювенильное трение почти не встречается на практике. Для его реализации необходима специальная очистка поверхностей и помещение трущихся тел в глубокий вакуум. Частным случаем сухого трения является чистое трение, когда на трущихся поверхностях отсутствуют смазки, окислы и загрязнение.

При наличии на контактирующих поверхностях тонких пленок смазки или окислов трение называют граничным. Для образования на теле таких пленок в смазке должны присутствовать поверхностно-активные вещества, например жирные кислоты.

Жидкостное или гидродинамическое трение имеет место при большой толщине разделительного смазочного слоя, когда неровности поверхностей не входят в непосредственный контакт. Жидкостное трение – это внутреннее трение в слое смазки, которое зависит от вязких свойств самой смазки. Если сухое и граничное трение бывает статическим и кинематическим, то гидродинамическое трение может быть только кинематическим [6].

Важнейшей особенностью внешнего трения при ОМД является то, что одно из трущихся тел находится в состоянии пластического течения. В отличие от обычного трения твердых тел (машинное трение), трение при ОМД называется пластическим. Вследствие пластической деформации тела резко возрастает плотность контакта поверхностей. Также значительно возрастает фактическая площадь касания, хотя она, как правило, не достигает размеров номинальной площади, то есть абсолютный контакт отсутствует. В связи с ростом контактной поверхности возрастает вероятность разрушения окисных пленок и выхода на поверхность новых частиц металла. Это способствует появлению сил молекулярного схватывания в процессе деформации. Пластическая деформация поверхностных слоев может быть значительно более интенсивной, чем средняя по объему деформация. Микрочастицы поверхности инструмента вдавливаются в поверхность металла, создавая местную дополнительную деформацию. Касатель-

ное напряжение создает дополнительные сдвиги в поверхностном слое деформируемой заготовки, что в итоге приводит к большему упрочнению этого слоя.

Еще одной особенностью пластического трения является наличие больших нормальных давлений на контактной поверхности, которые во многих случаях значительно превышают величину предела текучести материала.

Различные процессы ОМД различаются скоростью и длиной пути контактного скольжения. Малые значения скорости и длины пути контактного скольжения благоприятны с точки зрения уменьшения возможности молекулярного схватывания, то есть образования задиров и наростов на поверхности инструмента.

Важным фактором трения является высокая температура металла при горячих процессах обработки и значительный разогрев тонких поверхностных слоев металла даже при холодной деформации.

Существует достаточно много формул, описывающих силу и напряжение трения. Их можно разделить на три группы:

- содержащие в качестве независимой переменной какой-либо физический фактор (давление, сопротивление деформации, вязкость и т.д.);
- описывающие распределение сил трения в зоне контакта;
- определяющие среднюю удельную силу трения в зоне деформации.

Наиболее известной и широко применяемой является формула Амонтона:

$$\tau = f p.$$

Суждения о степени точности и возможности применения закона Амонтона для определения величины сил трения при ОМД очень противоречивы. Этот закон наиболее точно выполняется при холодной деформации с применением технологических смазок, когда f сравнительно мал [7].

Важная роль в теории трения принадлежит двучленным законам, например закону Кулона:

$$\tau = f' p + a,$$

где a – удельное значение сопротивления скольжению, обусловленное адгезией металла.

Закон Кулона отражает физические представления, согласно которым возникновение сил трения объясняется действием двух причин: механическим воздействием микронеровностей и молекулярным

взаимодействием. Практическое применение формул, выведенных с использованием двучленного закона трения, часто встречает трудности из-за недостаточной изученности эмпирических констант f' и a .

Большое распространение в теории ОМД получил закон трения, предложенный Зиббелем:

$$\tau = \psi \tau_s.$$

Коэффициент трения Зиббеля не может быть больше единицы из-за развития пластических сдвигов в приконтактном слое металла.

Применение закона Зиббеля вместо закона Амонтона во многих случаях позволяет значительно упростить математические операции и получить более простые конечные формулы. Он более правильно отражает физическую суть процесса трения, поскольку возникновение сил трения связано с пластической деформацией поверхностного слоя металла.

В процессах ОМД с применением технологической смазки, когда толщина слоя смазки относительно велика, сила трения определяется по закону жидкостного трения Ньютона:

$$T = \eta \cdot \Delta V \cdot F_k / \xi,$$

где η – динамическая вязкость смазки; ΔV – скорость скольжения; F_k – площадь контактной поверхности; ξ – толщина слоя смазки.

Напряжение трения в законе Ньютона $\tau = \eta \cdot \Delta V / \xi$.

В наиболее строгой форме закон Ньютона имеет вид

$$\tau = \eta dV / dy,$$

где dV / dy – градиент скорости сдвига по высоте слоя смазки.

При использовании закона Ньютона необходимо учитывать зависимость η от температуры и давления.

Основными факторами, определяющими величину трения в процессах ОМД являются:

- химический состав и свойства рабочего инструмента и деформируемого металла;
- состав и свойство окислов на поверхности деформируемого металла и инструмента;
- температура деформации;
- наличие и свойства смазки и технологического покрытия;
- степень деформации;
- скорость контактного скольжения;
- длина пути скольжения;
- наличие зон прилипания на контактной поверхности;
- интенсивность теплообмена на границе контакта.

Поскольку на преодоление сил контактного трения тратится значительная часть энергии, проблема снижения трения актуальна при совершенствовании технологических процессов ОМД.

В целях снижения трения эффективно используются технологические смазки, которые наносятся на заготовки или на инструмент.

Такие виды обработки, как например, холодная и горячая прокатка ряда цветных металлов, волочение, прессование тяжелых цветных металлов, листовая штамповка, холодное выдавливание, горячая и холодная прокатка труб и некоторые другие, не осуществляются в промышленных масштабах без применения технологических смазок.

Основными функциональными требованиями к смазкам являются следующие:

- снижение сил трения на контактной поверхности;
- уменьшение износа инструмента;
- предотвращение схватывания и налипания металла на инструмент;
- обеспечение чистоты и нужной шероховатости изделия;
- охлаждение инструмента;
- снижение теплопередачи между металлом и инструментом;
- уменьшение окисления металла и потери легирующих элементов в процессе обработки;
- обеспечение более равномерного распределения деформации по объему металла;
- уменьшение контактных давлений.

Смазки классифицируют по химическому составу, агрегатному состоянию, назначению и другим признакам. По агрегатному состоянию смазки можно разделить на несколько групп: масла и их производные, эмульсии, компаунды и пластичные смазки, твердые смазки.

Антифрикционная эффективность характеризует степень снижения сил трения в присутствии смазок. Для определения антифрикционной эффективности технологических смазок применяются стандартные испытания на машинах трения. Однако при таких испытаниях контакт трущихся поверхностей в большинстве случаев является точечным или линейным. Кроме того, существует значительная пластическая деформация одного из трущихся тел. Такие результаты могут служить лишь для приближенной оценки эффективности смазок при ОМД.

Все методы определения антифрикционной эффективности технологических смазок можно разделить на прямые и косвенные. К пря-

мым относятся те методы, которые основаны на измерении непосредственно сил трения или коэффициента трения. Косвенные методы основаны на исследовании влияния смазки на деформационные параметры, зависящие от трения. Кинематические или энергосиловые. Преимуществом косвенных методов является простота экспериментов, а недостатком – получение результатов, пригодных в основном для выводов качественного характера.

При ковке и штамповке, например, может анализироваться бочкообразование при осадке. Чем меньше бочка, тем лучше смазка по антифрикционному действию. При осадке кольца эффективность смазки оценивается по изменению внутреннего диаметра кольца d_0 . Показателем служит величина $e = (d_0 - d_1)d_0$. Чем меньше e , тем эффективнее смазка [7].

При прокатке для оценки эффективности смазок прокатывают в равных условиях несколько образцов и определяют коэффициент вытяжки. Чем эффективнее смазка, тем больше вытяжка, ниже удельное давление на валки и меньше упругая деформация элементов клетки. Иногда для получения более корректных результатов при исследовании эффективности смазки судят по полному коэффициенту вытяжки или суммарному обжатию.

Обычным методом оценки эффективности смазок при волочении является экспериментальное определение усилия волочения или удельного расхода энергии. При прессовании показателем эффективности смазки в основном служит усилие прессования. Для экспериментов используют метод координатных сеток, которые наносятся на поверхность разъемных образцов перед прессованием.

1.14. Способы определения коэффициента трения при ОМД

Термин «коэффициент трения», легко определимый с механической точки зрения, в процессах ОМД может иметь неоднозначное толкование в связи с особыми кинематическими условиями на контактной поверхности. При скольжении на контакте $f = \tau / p$. Это и есть коэффициент трения скольжения, соответствующий обычным механическим представлениям. Его величина зависит от ряда физических факторов: шероховатость поверхности, скорость скольжения, наличие смазки, свойства деформирующего инструмента и деформируемого металла и т. д. Если на контактной поверхности имеется зо-

на прилипания, то величина f является средним условным коэффициентом трения. Она зависит от размера зоны прилипания и от геометрических параметров очага деформации. Средний условный коэффициент трения меньше среднего физического коэффициента трения.

В теории ОМД под термином «коэффициент трения» обычно подразумевается средний коэффициент трения. Именно в этом виде f входит в различные теоретические формулы.

Все существующие методы исследования распределения удельных сил трения на контактной поверхности имеют те или иные недостатки. Получение истинных эпюр сил трения всегда остается проблемным. Поэтому в практике ОМД нашли применение сравнительно простые методы определения среднего коэффициента трения. Но даже в этих простых способах приходится учитывать зависимость трения от направления скольжения, что связано с анизотропией трения.

1.14.1. Метод вращения волоки

Метод вращения волоки широко используется как в лабораторных, так и в производственных исследованиях, в частности для оценки эффективности технологических смазок и подсмазочных покрытий на проволоке, прутках и трубах. Удобно применять этот метод на современных промышленных станах многократного волочения, у которых последний проход выполняется через вращающуюся волоку с целью устранения неравномерного износа.

В основе метода лежат некоторые допущения:

- при вращении волоки с любой частотой среднее контактное и полное напряжение остаются неизменными;
- скручивание изделия под действием тангенциальных сил трения отсутствует;
- условия подачи смазки в неподвижную и крутящуюся волоки одинаковы;
- разогрев изделия и волоки не зависит от скорости вращения последней.

Коэффициент трения определяется на основании измерения силы волочения через неподвижную и вращающуюся волоки поочередно. В остальном волочение проводится в идентичных условиях.

Среднее напряжение трения условно приложено в средней части очага деформации (рис. 1.16). Окружная составляющая скорости

вращения $V_\phi = \pi d_{\text{ср}} n$, где $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр очага деформации ($d_{\text{ср}} = (d_0 + d_1)/2$). Полный вектор скорости V поворачивается на угол ϕ , причем $\text{tg } \phi = V_\phi / V_x$, где V_x – продольная составляющая скорости контактного скольжения.

$$V_x = V / \cos \alpha,$$

где V – скорость волочения; α – угол наклона образующей волоки.

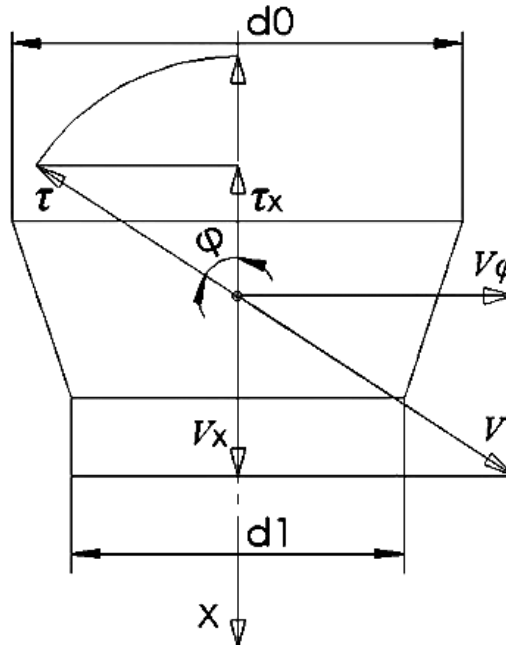


Рис. 1.16. Силы, действующие в очаге деформации при волочении

При повороте вектора скорости контактного скольжения вектор трения τ поворачивается на такой же угол ϕ . Продольная составляющая напряжения трения $\tau_x = \tau \cos \phi$.

P и P_k – сила волочения через неподвижную и вращающуюся волоки соответственно (рис. 1.17).

Для нахождения этих сил рассматриваются уравнения равновесия сил, приложенных к очагу деформации.

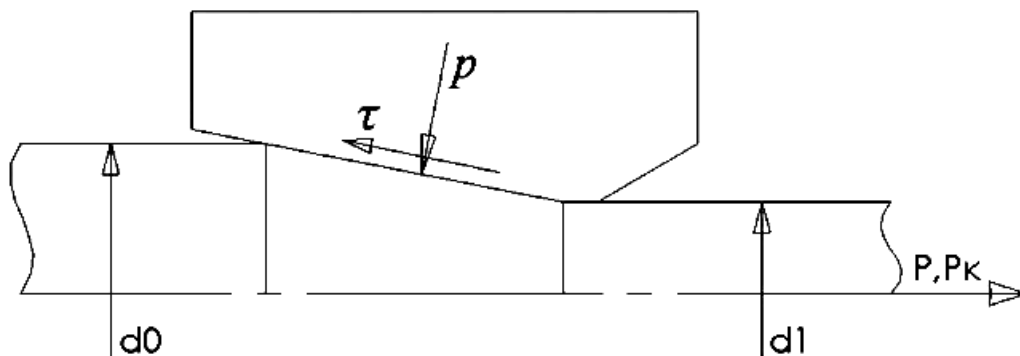


Рис. 1.17. Схема очага деформации при волочении

$$P = (p \sin \alpha + \tau \cos \alpha) F_k = (p \sin \alpha + \tau \cos \alpha) \frac{F_0 - F_1}{\sin \alpha},$$

где F_k , F_0 и F_1 – площади контактной поверхности, сечения изделия на входе в очаг деформации и на выходе из него соответственно.

Данное уравнение соответствует случаю волочения через неподвижную волоку. Из него можно выразить контактное давление p , учитывая, что $\tau/p = f$:

$$p = \frac{P}{\left(1 + \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha}\right) (F_0 - F_1)}.$$

В случае волочения через вращающуюся волоку

$$\begin{aligned} P &= (p \sin \alpha + \tau \cos \alpha \cos \varphi) F_k = \\ &= (p \sin \alpha + \tau \sin \alpha \cos \varphi) \frac{F_0 - F_1}{\sin \alpha} = \\ &= p \left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha} \cos \alpha\right) (F_0 - F_1). \end{aligned}$$

Приравнявая значения коэффициента давления, получаем

$$\frac{P}{1 + \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha}} = \frac{P_k}{1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha} \cos \varphi}.$$

Отсюда

$$f = \frac{\operatorname{tg} \alpha (P - P_k)}{P_k - P \cos \alpha} = \frac{\operatorname{tg} \alpha (1 - \frac{P_k}{P})}{\frac{P_k}{P} - \cos \varphi}.$$

Если волочильный стан имеет привод постоянного тока, то возможен замер якорных токов двигателя при вращении с выключенным (I) и с включенным (I_k) приводом кручения волоки. Можно считать, что

$$\frac{P_k}{P} \approx \frac{I_k}{I}.$$

1.14.2. Метод разрезной волоки

Метод разрезной волоки пригоден для лабораторных измерений коэффициента трения при волочении прутков и проволоки.

В этом методе используется разрезная волока, части которой стянуты шпильками, одновременно выполняющими роль месдоз для замера силы распорного усилия Q во время волочения (рис. 1.18). Ось

волокни лежит в плоскости разъема. Для определения коэффициента трения производится замер силы волочения P и распорного усилия Q . Далее записываются условия равновесия проекций сил на ось волочения и уравнения равновесия половины разрезной волоки.

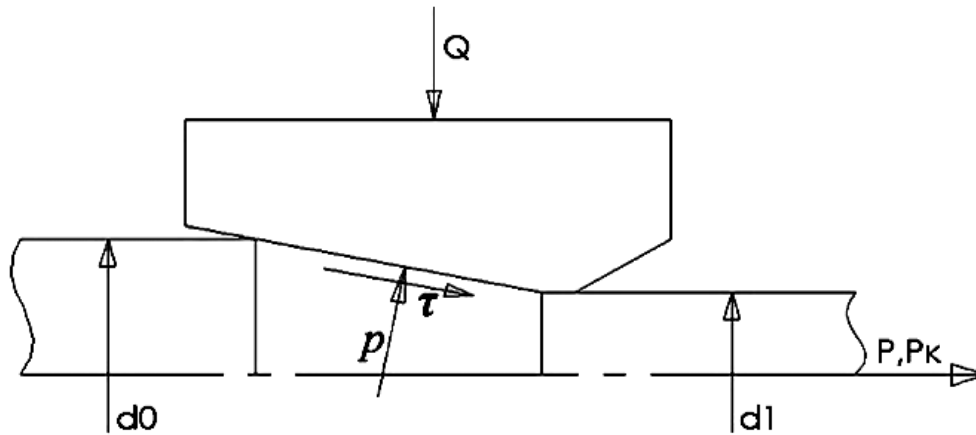


Рис. 1.18. Действие сил при волочении через разрезную волоку

Сила волочения

$$P = (p \sin \alpha + \tau \cos \alpha) F_k = (p \sin \alpha + \tau \cos \alpha) \frac{F_0 - F_1}{\sin \alpha} =$$

$$= p \left(1 + \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_1^2).$$

Контактное давление в этом случае

$$p = \frac{4P}{\pi \left(1 + \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha} \right) (d_0^2 - d_1^2)}.$$

Распорное усилие определяется по формуле

$$Q = (p \sin \alpha - \tau \cos \alpha) \frac{d_0 + d_1}{2} \frac{d_0 - d_1}{2 \operatorname{tg} \alpha} =$$

$$= (p \sin \alpha - \tau \cos \alpha) \frac{d_0^2 - d_1^2}{4 \operatorname{tg} \alpha} \cos \alpha =$$

$$= p \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} - f \right) \frac{\cos \alpha}{4} (d_0^2 - d_1^2).$$

Отсюда найдем

$$p = \frac{4Q}{\left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} - f \right) \cos \alpha (d_0^2 - d_1^2)}.$$

Приравняв значения p , получаем

$$\frac{P}{\pi + \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha}} = \frac{Q}{\cos \alpha (\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} - f)},$$

откуда получаем выражение для коэффициента трения

$$f = \frac{P \cos \alpha - Q \operatorname{tg} \alpha \cdot \pi}{P \cos \alpha \operatorname{tg} \alpha - Q \pi} = \frac{\cos \alpha - \pi \operatorname{tg} \alpha \frac{Q}{P}}{\sin \alpha - \pi \frac{Q}{P}}.$$

1.14.3. Метод торможения полосы для определения коэффициента трения при плоской прокатке

Прокатка полосы шириной b с заданным обжатием высоты h_0 до высоты h_1 осуществляется на гладких валках на стане, оснащённом месдозами для замера усилия прокатки P и пружинным устройством торможения полосы для замера заднего натяжения Q в момент остановки полосы и начала пробуксовки валков. В момент остановки полосы полностью исчезает зона опережения. На рис. 1.19 приведена схема действия сил трения при прокатке полосы.

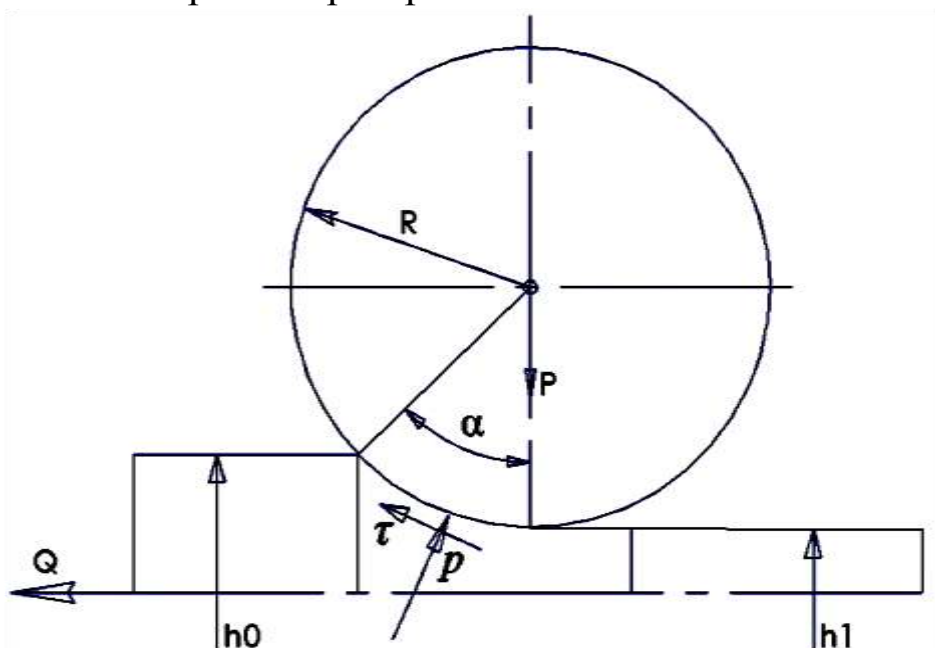


Рис. 1.19. Действие сил при прокатке полосы

Условие равновесия полосы в таком случае

$$\int_0^{\alpha} b p f R \sin \varphi d\varphi - \int_0^{\alpha} b p R \cos \varphi d\varphi = Q.$$

После интегрирования имеем

$$b p f R (1 - \cos \alpha) - b p R \sin \alpha = Q.$$

Отсюда получаем

$$p = \frac{Q/bR}{f(1-\cos \alpha) - \sin \alpha}, \text{ где } \alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}.$$

Запишем условие равновесия валка:

$$\int_0^{\alpha} bpR \cos \varphi d\varphi + \int_0^{\alpha} bpfR \sin \varphi d\varphi = P.$$

После интегрирования имеем

$$bpR \sin \alpha - bpfR(1 - \cos \alpha) = P.$$

Отсюда получаем

$$p = \frac{Q/bR}{\sin \alpha + f(1 - \cos \alpha)}.$$

Приравняв значения контактного давления p , легко определить среднее значение коэффициента трения в очаге деформации:

$$f = \frac{\sin \alpha (P + Q)}{(1 - \cos \alpha)(P - Q)}.$$

1.14.4. Метод максимального обжатия (метод прокатки клина)

Прокатывается клиновидная полоса до наступления пробуксовки валков. В этот момент исчезает зона опережения. При расчетах уширение полосы не учитывается. После извлечения полосы из валков измеряется максимально допустимая по условию захвата высота полосы на входе h_0 . На рис. 1.20 приведена схема действия сил трения при прокатке клиновидной полосы.

Определяется максимальный угол захвата

$$\alpha = \sqrt{\frac{h_0 - h_1}{R}}.$$

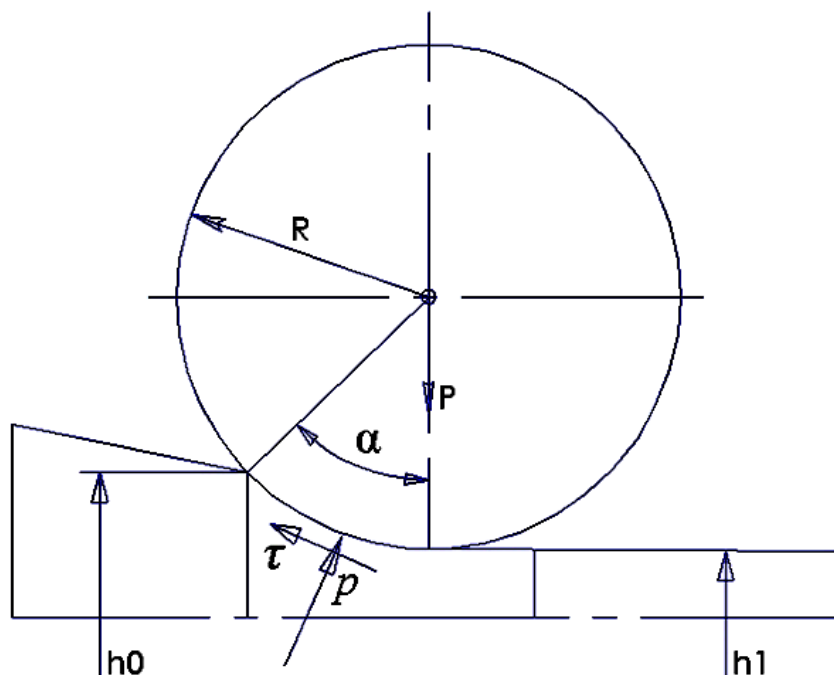


Рис. 1.20. Действие сил при прокатке клиновидной полосы

Условие равновесия

$$\int_0^{\alpha} pR \sin \varphi d\varphi = \int_0^{\alpha} pfR \cos \varphi d\varphi .$$

Отсюда

$$1 - \cos \alpha = f \sin \alpha , \text{ тогда } f = \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} .$$

1.14.5. Метод опережения

Относительное опережение $S = (V_1 - V) / V$, где V_1 и V – скорость полосы на выходе из очага деформации и окружная скорость вращения валков соответственно.

Используется метод рисков. На валок перед прокаткой наносят риски так, чтобы после прокатки они отпечатались на полосе.

Опережение в этом случае вычисляется по формуле $S = \frac{l_0 - l_1}{l_0}$, где l_0 – длина дуги бочки между рисками; l_1 – расстояние между отпечатками рисков на прокатанной полосе.

Если известна частота вращения валков n , то окружная скорость валков $V = 2\pi Rn$. На рис. 1.21 приведена схема действия сил трения при прокатке.

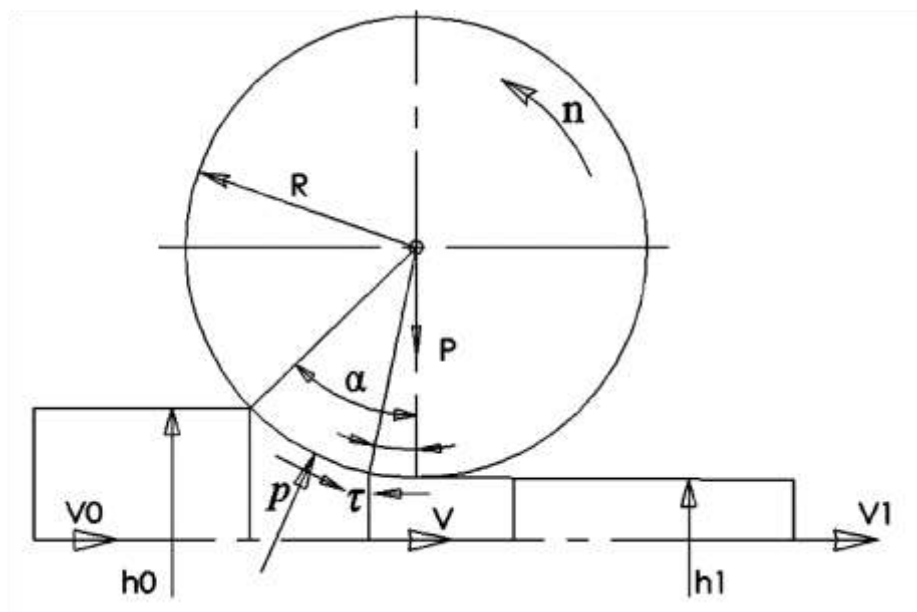


Рис. 1.21. Действие сил при прокатке

Условие равновесия сил, приложенных к полосе

$$\int_0^{\alpha} pR \sin \varphi d\varphi + \int_0^{\gamma} pfR \cos \varphi d\varphi = \int_{\gamma}^{\alpha} pfR \cos \varphi d\varphi.$$

После интегрирования получаем

$$1 - \cos \alpha + f \sin \gamma = f(\sin \alpha - \sin \gamma).$$

Отсюда получаем

$$f = \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha - 2 \sin \gamma}.$$

Для определения нейтрального угла γ записывается условие постоянства секундных объемов $V_1 h_1 = V h_{\gamma}$.

Тогда $h_{\gamma} = h_1 V_1 / V = h_1(1 + S)$.

Справедливо равенство

$$2R + h_1 = 2R \cos \gamma + h_{\gamma} = 2R \cos \gamma + h_1(1 + S).$$

Отсюда получим

$$\cos \gamma = 1 - \frac{h_1 S}{2R}, \quad \sin \gamma = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h_1 S}{2R}\right)^2}.$$

1.16.6. Метод разрезного бойка для определения коэффициента трения при осесимметричной осадке

На бойке, состоящем из половин, стянутых по плоскости разъема силоизмерительными шпильками, осуществляется осадка одновре-

менно двух одинаковых образцов. Исходные размеры образцов d_0 и h_0 , при этом $h_0/d_0 \leq 5,2$. Осадка выполняется без бочкообразования, что позволяет считать деформацию однородной. На рис. 1.22 приведена схема действия сил в точке контакта при прокатке.

Текущий диаметр образца

$$d = d_0 \sqrt{h_0/h}.$$

В ходе осадки измеряется осевая сила P и распорное усилие Q .

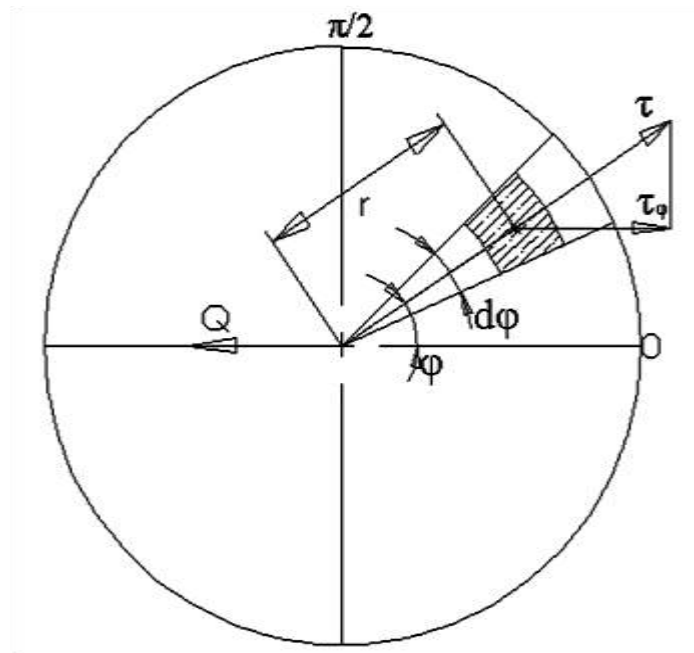


Рис. 1.22. Действие сил в точке контакта при прокатке

Среднее контактное давление

$$p = \frac{P}{2R^2}, \quad \tau_y = \tau \cos \varphi,$$

$$Q = 4 \int_0^{\pi/2} \int_0^R \tau \cos \varphi r dr d\varphi = 2\tau R^2 \int_0^{\pi/2} \cos \varphi d\varphi = 2\pi\tau R^2.$$

Отсюда получим

$$\tau = \frac{Q}{2\pi R^2}.$$

Далее вычисляется коэффициент трения

$$f = \frac{\tau}{p} = 0,5 \frac{Q}{P}.$$

Методика допускает независимость среднего коэффициента трения f от степени деформации при осадке.

Прямых экспериментальных методов определения коэффициента трения по Зиббелю $\psi = \tau / \tau_s$ не существует из-за невозможности замера или расчета сопротивления сдвиговой деформации металла при контактного слоя. В ориентировочных расчетах принимают

$$\psi = 2f.$$

1.15. Явление сверхпластичности и его использование в процессах ОМД

Способность поликристаллических материалов при определенных температурно-скоростных условиях проявлять аномально высокое относительное удлинение в сотни и даже тысячи процентов от стандартного при относительно низких напряжениях течения принято называть сверхпластичностью.

Научно-технический прогресс выдвинул эффект сверхпластичности (СП) материалов в число важных факторов, способствующих повышению эффективности технологий и качества выпускаемой продукции. Использование режимов СП в процессах объемной штамповки и формовки листовых заготовок в различных специализированных процессах формообразования позволяет добиться беспрецедентного расширения возможностей пластической обработки, снижения энергоемкости процессов, существенной экономии металла, повышения коэффициентов использования металла в результате уменьшения припусков на механическую обработку.

Вместе с тем реализация состояния СП при деформации металлов значительно усложняет и удорожает технологию их обработки, в связи с необходимостью подготовки ультрамикроструктуры исходных заготовок и регламентации температурно-скоростного режима сверхпластической деформации. Это требует создания дорогостоящих изотермических блоков, реконструкции приводов гидравлических прессов, оснащения штамповочных агрегатов устройствами автоматического регулирования температурного режима работы штампов и скорости деформации.

Интерес к явлению сверхпластичности со стороны специалистов ОМД объясняется удачным сочетанием технологических характеристик сверхпластичных материалов. Ресурс деформируемости материалов в состоянии сверхпластичности возрастает в десятки раз, а сопротивление деформации в несколько раз меньше чем в пластическом состоянии. Состояние сверхпластичности, например, при штамповке позволяет получить в процессах относительно не большой мощности более крупные изделия сложных форм. В отдельных случаях оказывается возможным использование при деформации сверхпластичных материалов не типичные для ОМД деформации растяжения и кручения, которые осуществляются на более простых и экономичных по сравнению с типовым кузнечно-штамповочным оборудованием установках. Хорошие результаты достигаются при использовании СП в процессах ОМД малопластичных и труднодеформируемых материалов, при получении деталей особо сложной формы с минимальными припусками на механическую обработку, при штамповке крупногабаритных деталей, возможность получения которых обычно лимитируется номинальным усилием прессов.

Феноменологически сверхпластичность определяется как способность материалов к вязкопластической деформации и характеризуется совокупностью следующих основных признаков [8]:

- повышенная склонность СП материалов к скоростному упрочнению;
- большой ресурс деформационной пластичности;
- напряжение течения в состоянии СП значительно меньше предела текучести материалов в обычном пластическом состоянии.

Сильная зависимость напряжения течения от скорости деформации объединяет сверхпластичные материалы по реологическим свойствам с вязкими жидкостями. К этому же классу обычно относятся металлы и сплавы, деформируемые в горячем состоянии, однако, в отличие от них, СП материалы имеют более развитую вязкую компоненту течения.

По структурному состоянию СП имеет две разновидности:

- сверхпластичность материалов и сплавов с особо мелким зерном менее 10 мкм;
- сверхпластичность полиморфных металлов и сплавов при их деформации в процессе фазовых превращений; иногда в эту разновидность включают также СП металлов вследствие анизотропии коэф-

фициента теплового расширения и металлов, подвергшихся нейтронному облучению.

В ультрамелкозернистое состояние сплавы обычно переводят предварительной термической или термомеханической обработкой. Для получения структурной СП важно, чтобы зерна имели приблизительно равноосную форму, а их размеры в процессе нагрева до температуры деформации и при дальнейшей деформации не претерпевали бы существенного увеличения. Наилучшие условия для предотвращения роста зерна имеют двухфазные сплавы. Поэтому эффекта СП чаще всего достигают у сплавов эффектоидного состава. Однако СП может наблюдаться и у однофазных сплавов, а также у чистых металлов, например у никеля, если нагреть его до температуры деформации со скоростями, исключающими значительный рост зерна [8]. При этом росту зерна может препятствовать либо избыточная дисперсная фаза, выделяющаяся из твердого раствора на границах зерен, либо примеси, присутствующие в технически чистых металлах.

Сверхпластичность при деформации полиморфных металлов и сплавов в процессе фазового превращения обнаружена у железа и сталей, титана и его сплавов, циркония, цинка, урана. В отличие от структурной, для СП фазового превращения характерно постоянное изменение фазового состава и структуры в процессе деформации.

Температурный интервал существования структурной СП достаточно широк. Разный для различных металлов и сплавов, он обычно находится в интервале от температуры начала рекристаллизации до температуры, близкой к плавлению. Нижняя граница температурного интервала обусловлена обычно ролью диффузионных процессов в механизме деформации сверхпластичных материалов, а верхняя граница соответствует температуре начала собирательной рекристаллизации, в результате которой начинается интенсивный рост зерна. Однако какой бы ни была температура структурной СП, она должна поддерживаться постоянной по объему деформируемого тела в течение всего периода деформации для равномерного течения металла.

Сверхпластичность, связанная с фазовым превращением, может быть реализована при различных температурных режимах: в процессе монотонно изменяющейся температуры, проходящей через интервал прямого или обратного превращения; при термоциклировании в пределах температурной амплитуды, включающей интервал температур превращения; при фиксированной температуре вблизи интервала

превращения. Таким образом, температура деформируемого материала, так же как и его структура, претерпевает значительные изменения в процессе деформации в режиме СП, связанной с фазовыми превращениями.

Скорость деформации для обеспечения структурной СП должна быть, с одной стороны, достаточно малой, чтобы успевали в полном объеме протекать диффузионные процессы, участвующие в деформации, с другой стороны, достаточно высокой, чтобы в условиях повышенных температур не допустить чрезмерного роста зерна. Для большинства металлов и сплавов оптимальный интервал скоростей сверхпластической деформации находится между интервалами скоростей высокотемпературной ползучести и скоростей пластической деформации.

Основными характеристиками проявления эффекта СП считается показатель скоростной чувствительности напряжения течения к изменению скорости деформации

$$m = \frac{d(\lg \sigma)}{d(\lg \dot{\epsilon})}.$$

Считается, что сверхпластичное поведение материалов наблюдается при $m > 0,3$. В отдельных случаях появления эффекта СП величина m достигает 1. При таких значениях m обеспечивается достаточно высокое скоростное упрочнение металла, замедляющее развитие локализации деформации, и, как следствие, достигается большая пластичность [9].

Известно множество металлов и сплавов, а также интерметаллидов, керамических и композиционных материалов, проявляющих эффект сверхпластичности. Иногда считают, что любой сплав с ультрамелким равноосным зерном при повышенных температурах и достаточно низких скоростях деформации может в большей или меньшей мере проявлять признаки структурной сверхпластичности. Однако для практического использования СП не достаточно иметь в исходной заготовке ультрамелкое равноосное зерно. Необходимо еще сохранить малый размер зерна в течении всего процесса сверхпластической деформации, причем следует отметить, что для мелкозернистой структуры характерна большая склонность к росту зерна, обусловленная стремлением уменьшить суммарную энергию межзеренных границ. Характеристики сверхпластического состояния для некоторых металлов и сплавов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики сверхпластического состояния для некоторых металлов
и сплавов

| Основа сплава | Марка сплава | Средний размер зерна, мкм | $T_{сп}, ^\circ\text{C}$ | $\varepsilon'_{сп}, \text{с}^{-1}$ | $\sigma_{сп}, \text{МПа}$ | m | $\delta_{max}, \%$ |
|------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|------|--------------------|
| Al | АЦ5К5 | 2,0 | 550 | 10^{-2} | 4,0 | 0,60 | 1000 |
| | В96Ц | 5,0 | 465 | 10^{-3} | 5,0 | 0,60 | 850 |
| | 1420 | 5,5 | 450 | 4×10^{-4} | 5,0 | 0,55 | 700 |
| | АМг6 | 9,5 | 420 | 6×10^{-6} | 5,0 | 0,45 | 410 |
| Fe | ВНЦ48 | 2,5 | 950 | 10^{-3} | 25,0 | 0,47 | 600 |
| | 03Х26Н6Т | 2,0 | 780 | 4×10^{-3} | 80,0 | 0,50 | 280 |
| Mg | МА8 | 15,0 | 400 | 2×10^{-3} | 9,0 | 0,42 | 300 |
| | МА15 | 15,0 | 450 | 2×10^{-3} | 11,0 | 0,45 | 320 |
| | МА21 | 15,0 | 450 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 2,0 | 0,55 | 475 |
| Ni | ЖС6КП | 5,5 | 1100 | $1,7 \times 10^{-3}$ | 5,0 | 0,50 | 650 |
| | ЖС6К | 7,5 | 1125 | 5×10^{-3} | 5,0 | 0,40 | 420 |
| Ti | BT3-1 | 1,2 | 870 | 3×10^{-3} | 5,0 | 0,52 | 2000 |
| | BT6c | 1,5 | 900 | 10^{-3} | 10,0 | 0,52 | 1800 |
| | BT9 | 2,0 | 950 | $2,7 \times 10^{-3}$ | 29,0 | 0,60 | 1800 |
| | BT14 | 1,2 | 870 | 5×10^{-3} | 5,0 | 0,70 | 2000 |
| ZrO ₂ | Y-TZP | 0,3 | 1550 | $8,3 \times 10^{-3}$ | 9,0 | 0,50 | 800 |

До недавнего времени одним из серьезных препятствий использования СП в ОМД считались очень малые скорости пластической деформации, при которых это состояние проявляется. Сравнительно недавно стала активно развиваться технология высокотемпературной сверхпластической деформации некоторых сплавов и композитов при скоростях до 10^2 с^{-1} , существенно превышающих скорости деформации, характерные для традиционных процессов ОМД. Например, рекордное удлинение в 1250 % получено из механически легированного алюминиевого сплава TN9021 (4,5 % Cu, 1,5 % Mg, 1,1 % C, 0,8 % O₂, остальное – Al).

Скорости сверхпластической деформации объемных аморфных сплавов на три порядка превышают скорости обычной пластической деформации.

Особенности течения СП материалов составляют основу технологических преимуществ, реализуемых при использовании эффекта СП в различных процессах ОМД. К настоящему времени в отечественной и зарубежной практике получили развитие две группы процессов:

– принципиально новые процессы формообразования, реализация которых возможна лишь благодаря особенностям сверхпластического состояния;

– традиционные процессы (в основном объемная изотермическая штамповка), где СП используется для повышения эффективности этих процессов.

Один из первых процессов, разработанных специально для формирования в состоянии СП длинномерных изделий, – процесс бесфильтерного волочения (формообразование растяжением). Степень вытяжки заготовки при бесфильтрном волочении зависит от степени устойчивости материала заготовки к локализации деформации, то есть от показателя m . В этом процессе при $m > 0,5$ достижимы коэффициенты вытяжки 5–10.

Наиболее востребованными из развивающихся в настоящее время нетрадиционных процессов ОМД сверхпластичных материалов являются процессы формовки (например газостатической) листовых заготовок и термоупругой штамповки тонкостенных оболочек с оребрением. При сравнительно малой энергоемкости эти процессы позволяют в несколько раз снизить трудоемкость изготовления полых изделий сложной формы, сокращая число технологических операций.

Особенно перспективными являются комбинированные процессы, в которых сочетается сверхпластическая формовка с диффузионной сваркой. Такие процессы создают условия для качественного скачка в технологии производства крупногабаритных тонкостенных конструкций сложной формы, в частности, несущих конструкций летательных аппаратов, которые могут заменить более тяжелые и менее прочные конструкции, собираемые из многочисленных деталей болтовыми соединениями, клепкой и сваркой.

Особенности вязкого течения сверхпластичных материалов позволяют также расширить возможности и повысить эффективность точной изотермической объемной штамповки деталей сложной формы, что приводит к минимизации отходов металла, снижению усилия штамповки, энергозатрат и трудоемкости.

Решение вопроса реализации скоростного режима деформации связано с выбором оборудования для процессов сверхпластической деформации. Низкая скорость деформации, необходимая для обеспечения эффекта СП, является серьезным препятствием для практического применения СП в процессах ОМД, например, при горячей объемной штамповке, так как это влечет за собой снижение производи-

тельности, усложнение штампов, необходимость реконструкции приводов гидравлических прессов. Однако опыт освоения этих процессов в производственных условиях, накопленный к настоящему времени, показывает, что режим СП при штамповке целесообразно использовать на заключительной стадии техпроцесса – для заполнения сложных элементов гравюры штампов. Для осуществления этого требуется максимальное усилие штамповки при штатной скорости работы пресса. Так как стадия доштамповки составляет лишь малую часть всего рабочего хода пресса, то снижение скорости до уровня СП на этой стадии мало влияет на производительность процесса в целом.

При оценке экономической эффективности СП наиболее существенными факторами являются стоимость материала заготовки и время формовки. Увеличение этих показателей приводит к снижению эффективности процесса и наоборот.

Существующие сплавы с высоким уровнем СП по ряду причин не перспективны в коммерческом отношении. Сверхпластичный сплав, приемлемый для рынка, должен удовлетворять определенным требованиям, в частности потребностям производителей, его химический состав должен быть близок к составу широко используемого подобного промышленного сплава.

1.16. Остаточные напряжения и их влияние на качество производимой продукции

Остаточными принято называть напряжения, наблюдаемые в материале при отсутствии внешних воздействий (силовых и тепловых). Микронапряжения действуют в объеме зерна металла или сплава, макронапряжения в объеме заготовки или детали. Остаточные напряжения любой природы подразделяются на три рода [10]:

- напряжения первого рода, уравнивающиеся в пределах областей, размеры которых одного порядка с размерами тела;
- напряжения второго рода, уравнивающиеся в объемах, размеры которых одного порядка с размерами зерен;
- напряжения третьего рода, уравнивающиеся в объемах одного порядка с размерами элементарной кристаллической ячейки.

Остаточные напряжения первого рода возникают под влиянием неоднородного охлаждения или нагрева, наклепа или фазовых и структурных превращений. Эти напряжения оказывают существенное

влияние на поведение металла при воздействии внешних нагрузок и на многие его механические свойства.

Механизм возникновения в поликристаллах напряжений второго рода наглядно показан в работах [11], [12]. Если некоторая область деформируемого металла представлена несколькими разориентированными кристаллами, то общая макродеформация этой области выражается формулой

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{пл} i \delta + \varepsilon_{упр} (1 - i \delta),$$

где i – число зон пластичности на 1 см длины области; δ – размер этих зон в направлении действующего напряжения.

Например, рассматривается совместная деформация трех смежных зон, из которых средняя испытывает пластические деформации, а крайние находятся в упругом состоянии. Поведение этих зон и механизм возникновения остаточных напряжений при снятии нагрузки легко иллюстрируется трехстержневой механической системой, нагруженной общей внешней нагрузкой. После разгрузки в средней зоне не возникают сжимающие остаточные напряжения, а в крайних – растягивающие. Следовательно, между смежными зонами возникают внутренние напряжения, которые изменяют межплоскостное расстояние в атомной решетке. Но деформация может быть неоднородной не только в отдельных кристаллах, но и в отдельных блоках и даже в различных участках одного и того же блока. Напряжения могут быть уравновешены внутри микрообласти и не оказывать влияния на величину и распределение остаточных напряжений первого рода.

Напряжения третьего рода возникают при переходе атомов через потенциальные барьеры, то есть при их перемещениях на расстояния не меньше половины межатомного расстояния. Они нарушают кристаллическую структуру и ответственны за необратимый характер пластической деформации металлов, при которой внутренняя энергия повышается на величину

$$\Delta A = \delta A - \delta Q,$$

где δA – работа внешних сил при деформации; δQ – теплота, выделяющаяся в пластически деформируемом теле.

Методы определения остаточных напряжений в сварных конструкциях представляют собой самостоятельную и большую область исследований.

При определении остаточных напряжений первого и второго рода широко используются как аналитические, так и экспериментальные методы. Следует отметить, что первые до настоящего времени оста-

ются более совершенными и полезными в технологической практике. Скорее всего, такая ситуация сохранится и в дальнейшем, поскольку среди известных методов опытного определения остаточных напряжений любого рода нельзя выделить какой-либо как перспективный и непротиворечивый.

ВНИИМЕТИЗом разработан метод определения остаточных напряжений в проволоке, состоящий в последовательном стравливании поверхностного слоя и регистрации длины образца с точностью 0,01 мм. Отличие метода заключается в том, что измерения проводятся непрерывно, образец постоянно расположен в емкости с кислотой, регистрация удлинения производится индикатором часового типа. Величина продольных остаточных напряжений подсчитывается по формуле Хейна

$$\sigma_x = E \frac{r_n^2(l_n - l_0) - r_{n-1}^2(l_{n-1} - l_0)}{(r_{n-1}^2 - r_n^2)l_0},$$

где σ_x – остаточные напряжения в слое металла; E – модуль упругости первого рода; l_0 , l_{n-1} , l_n – длины образцов; r – радиус обрабатываемого образца; n , $n-1$ – индексы, определяющие порядковый номер стравливаемого концентрического слоя металла.

На величину и характер распределения остаточных напряжений по поперечному сечению наклепанных прутков, проволоки и труб оказывают влияние: подготовка поверхности металла к волочению, величина суммарного обжатия, угол рабочей зоны волоки, химический состав сплава, величина единичных обжатий при постоянном суммарном обжатии, температурно-скоростные условия волочения, способ приема протянутого металла после выхода из волоки, смазка и способ ее подачи в зону обжатия. При многопроходном бухтовом волочении проволоки и труб важным фактором, влияющим на величину остаточных напряжений, является противонапряжение.

Процесс подготовки поверхности металла к волочению заключается в удалении с поверхности окалины, образовавшейся после горячей прокатки или прессования. Несмотря на сравнительно высокую температуру горячего передела, в металлоизделиях образуются остаточные напряжения при их охлаждении на моталках или при замачивании. Роль процесса подготовки поверхности заготовки к волочению состоит не только в очистке ее от окалины, но и в частичном снятии остаточных напряжений, поскольку при этом с поверхности удаляет-

ся некоторый слой металла, в котором чаще всего локализуются растягивающие осевые и тангенциальные напряжения.

Наиболее важным вопросом в производстве холодноотянутых прутков, проволоки и труб из любых металлов и сплавов является вопрос об оптимальной величине единичных обжатий. Самыми первыми крупными обстоятельными работами, посвященными данному вопросу, были исследования Бюлера. Остаточные напряжения замерялись на прутках больших диаметров (порядка 50 мм) из медных сплавов и стали с различным содержанием углерода после волочения с малыми обжатиями. Остаточные напряжения определялись по величине упругой деформации тянутых образцов после односторонней послойной фрезеровки. Именно Бюлер открыл эффект резкого снижения остаточных напряжений при волочении с малыми обжатиями. В результате многочисленных исследований одно- и многопроходного волочения Бюлер пришел к следующим выводам.

При незначительном обжатии (от 0,4 до 1 %) на поверхности прутков возникают сжимающие как продольные, так и тангенциальные напряжения, а в середине – растягивающие. Это объясняется тем, что благодаря совместному действию трения и радиальных сжимающих усилий наружные слои прутка растягиваются в продольном направлении. При выходе из волоки пластически удлиненная поверхностная зона стремится удлинить также и его сердцевину, которая подвергалась лишь упругим деформациям. При обжатии прутка более чем на 1 % знак напряжений меняется, при этом самые высокие напряжения возникают в поверхностных зонах. При обжатиях порядка 0,9 % поверхностные напряжения близки к нулю.

На эффективность чистовых проходов с малыми обжатиями указывает достаточно большое количество исследований различных авторов. В частности, И.Л. Перлин [13] рекомендует вести волочение при максимальных единичных обжатиях, а в последних проходах для выравнивания напряжений снижать обжатия до 0,8–1,5 %.

Существенное влияние на величину остаточных напряжений в поверхностных слоях холодноотянутых изделий оказывает распределение единичных обжатий по маршруту волочения. Применение «жестких» (30–33 %) обжатий по маршруту с «облегченной» (4–6 %) последней протяжкой позволяет снизить остаточные напряжения в 2,8–3 раза по сравнению с другими вариантами маршрута.

Что касается влияния величины угла рабочего конуса волоки на возникающие после волочения остаточные напряжения, то здесь

мнения большинства исследователей совпадают. Так, исходя из опытных данных по волочению канатной проволоки известно, что увеличение угла рабочего конуса с 5 до 100 увеличивает максимальную величину растягивающих напряжений в 1,5–3 раза в зависимости от величины частных обжати. Установлено, что при постоянном обжати с уменьшением угла конусности волокнистые остаточные напряжения на поверхности проволоки снижаются. С ростом угла рабочей зоны волокнистость увеличивается и составляющая нормального напряжения на контактной поверхности, параллельная оси канала, что приводит к большему отставанию периферийных слоев от центральных и, следовательно, к большим дополнительным осевым остаточным напряжениям.

Химический состав сплавов также влияет на величину остаточных напряжений. Результаты исследований волочения стальной проволоки с содержанием углерода от 0,16 до 0,81 % показывают, что растягивающие остаточные напряжения на поверхности растут при концентрации углерода от 0,40 до 0,45 %, а затем падают. При этом напряжения сжатия в центре непрерывно возрастают. Определяя рентгеновским методом величину остаточных напряжений второго рода в патентованной и затем протянутой проволоке с различным содержанием углерода, работники ЦЗЛ Белорецкого металлургического комбината установили, что с увеличением содержания углерода, остаточные напряжения растут после патентирования и остаются практически неизменными после волочения.

Влияние скорости волочения на величину остаточных напряжений следующее: чем выше скорость, тем меньше уровень напряжения трения, меньше неравномерность деформации по сечению и, следовательно, ниже остаточные напряжения.

Что касается влияния смазки: чем она лучше, то есть чем меньше коэффициент контактного трения, тем меньше касательные, а значит и растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях. Опытные данные показывают, что при плохой смазке остаточные напряжения в приконтактной зоне проволоки возрастают настолько, что сами могут вызвать разрушение металла.

Исследуя искажения координатных сеток, нанесенных на продольных разрезах прутков и труб по плоскости диаметра, установили, что при волочении в режиме гидродинамического трения в волоке имеет место более равномерная деформация по сечению проволоки, чем при волочении в режиме граничного трения. Это дает основание

предположить, что в готовом изделии, полученном методом волочения в режиме гидродинамического (или гидростатического) трения, распределение остаточных напряжений по сечению будет более благоприятным.

При производстве холодноотянутых труб в основном сопоставляются по влиянию на величину и распределение остаточных напряжений различные схемы волочения. Установлено, что наиболее неблагоприятным способом является безоправочное волочение, после которого уровень поверхностных остаточных как осевых, так и тангенциальных напряжений наиболее высок. Применение оправок во всех случаях способствует уменьшению напряжений. Возможны даже варианты, при которых на поверхности труб после волочения возникают сжимающие остаточные напряжения. Из анализа результатов многочисленных исследований видно, что изменением технологических параметров процесса волочения, формы инструмента, а также последовательностью операций можно добиться желаемого уровня и благоприятного характера распределения остаточных напряжений в холодноотянутых трубах.

Противонатяжение во всех видах волочения снижает уровень остаточных напряжений, как в прутках, так и в трубах. Это легко объясняется снижением контактных давлений и трения, и, следовательно, уменьшением неравномерности распределения деформаций по сечению протягиваемого изделия и приконтактного разогрева металла. При волочении с противонатяжением уменьшение угла рабочего конуса волоки более естественно, поскольку с ростом заднего натяжения интервал оптимальных углов (минимум силы волочения) смещается в сторону меньших значений. Особенно эффективно волочение с противонатяжением с малыми единичными обжатиями. Сравнительно высокое напряжение волочения с противонатяжением зачастую способствует уменьшению поверхностных растягивающих остаточных напряжений за счет внеконтактной пластической деформации.

Главная трудность в решении проблемы определяется несовершенством методов измерения остаточных напряжений. Оптимизация технологии невозможна без надежного определения функции отклика.

Введена некоторая геометрическая классификация остаточных напряжений, но не выяснено, напряжения какого рода пагубно влияют на эксплуатационные характеристики изделий.

В описанных экспериментальных методах чаще всего невозможно установить род напряжений, их направление, распределение в объеме, а иногда и знак. Активно обсуждаются продольные (осевые), тангенциальные, иногда радиальные остаточные напряжения, осознанно или интуитивно считая их главными. Однако напряженное состояние характеризуется тензорными величинами. В объеме деформированного тела всегда можно выделить оптимальные направления действия главных напряжений и максимальных касательных напряжений.

Перечисленные методы замера остаточных напряжений не позволяют однозначно утверждать, что рассчитанные значения напряжений соответствуют конкретному направлению. О знаке напряжений можно судить лишь в том случае, когда определена область их уравнивания. Если на уровне замыкания напряжений второго рода установлено действие сжимающих напряжений, то нельзя утверждать, что на макро-уровне остаточные напряжения также сжимающие. Это легко проиллюстрировать простейшей моделью. Пусть эластичная оболочка (мешок) заполнена мелкими пружинами. Если нагрузить оболочку и рассмотреть отдельные пружины или группы пружин, то легко найти растянутые. Однако по их состоянию нельзя судить о напряженном состоянии макрообъема нагруженной оболочки.

Ртутные и аммиачные пробы при определении склонности высокоцинковых латуней к межкристаллитной коррозии выявляют лишь наличие остаточных напряжений без определения их рода и направления. Поэтому результаты анализа мало помогают в выяснении причин возникновения этих напряжений.

Метод разрезных колец [14, 15] в его классическом понимании сложен в реализации, поскольку требует после разрезки кольца послойного стравливания с замером изменений диаметра и пересчетом по условию равновесия тангенциальной составляющей остаточных напряжений. Расчет напряжений ведется всегда в рамках гипотезы линейного распределения напряжений в оставшихся слоях трубы, хотя эта гипотеза и нуждается в подтверждении. В модифицированном виде метод разрезных колец распространен на промышленных предприятиях в качестве средства количественной оценки уровня тангенциальных остаточных напряжений в трубах. Упрощен метод отсутствием послойного стравливания. При таком использовании метода, результаты замеров напряжений чаще всего оказываются абсурдными. Если эпюра тангенциальных напряжений симметрична относительно

средней линии сечения трубы, то после разрезки кольца его диаметр не изменяется, и будет сделан вывод об отсутствии напряжений. На самом деле и очень высокие по уровню напряжения могут быть уравновешены по изгибающим моментам. Даже правильное применение (с травлением) метода разрезных колец к анализу остаточных напряжений в латунных трубах не гарантирует достоверного результата. При стравливании учитывается средняя толщина стравленного слоя, определяемая, например, весовым способом. Однако при травлении латуни границы зерен легко протравливаются на сравнительно большую глубину, и разгрузка по остаточным напряжениям проходит более интенсивно, что не учитывает расчетная процедура и что, скорее всего, невозможно учесть в реальных условиях испытаний.

Все сказанное в равной степени относится и к методам вырезаемых полосок, по деформации которых судят об уровне продольных остаточных напряжений. Распределение продольных напряжений в стенке трубы, вероятно, можно определить методом послойного стравливания, широко распространенным в проволочном производстве и до сих пор не трансформированным в метод определения напряжений в трубах.

Рентгеновские методы не дают возможность определять остаточные напряжения первого рода, которые, по нашему мнению, в наибольшей степени ответственны за работоспособность конструкций и эксплуатационные свойства металлоизделий. Уровень и знак микронапряжений зависят в большой степени от размеров зерна и базы сканирования. В изготовлении эталонных образцов, лишенных остаточных напряжений, существуют значительные трудности. Даже изготовленный из порошков эталонный образец не может быть разгружен полностью. Исходный порошок на микроуровне всегда подвержен действию остаточных напряжений. При прессовании порошка из-за неравномерности распределения давлений по объему брикета возникают напряжения первого рода, от которых трудно избавиться при отжиге. При температурах отжига развиваются процессы коагуляции (спекания), интенсивность которых зависит от плотности. Спекание и частичная рекристаллизация характеризуются новым распределением остаточных напряжений. Поэтому создание эталонных образцов, по которым можно надежно оценить рентгеновский шум, проблематично еще и по причине отсутствия методов их аттестации.

Определение направлений действия напряжений рентгеновскими методами принципиально невозможно. Расположение щели, вдоль

которой проводят сканирование при съемке, говорит лишь о направлении усреднения замеренных напряжений, но не о направлении действия самих напряжений.

Методы голографической топографии, эффективно применяемые для анализа остаточных напряжений в крупногабаритных конструкциях, трудно адаптировать к оценке качества холодноотянутых труб, особенно тонкостенных. Существенная неравномерность распределения деформаций и температуры в стенке трубы провоцируют пиковые значения поверхностных остаточных напряжений. При этом особенно высокие значения напряжений сосредотачиваются в очень тонком (0,2–0,4 мм) поверхностном слое. Топографические изменения поверхности анализируемого образца в голографических методах порождаются локальными механическими воздействиями (сверление, внедрение инденторов и др.). Деформация окрестности отверстия или лунки не дает представления о поверхностных напряжениях, так как в нее вовлекаются глубинные слои металла. Надежность пересчета деформаций в напряжения определяется выбором физического уравнения связи. Чаще всего это уравнение – закон Гука. Если деформируемая среда проявляет свойства нелинейной упругости, то ошибка в определении остаточных напряжений неизбежна и трудно определима.

Приходится признать после анализа известных методов, что определить экспериментально остаточные напряжения в трубах с требуемой точностью невозможно. Остаются теоретические методы, перспективность которых представляется более реальной. Хотя до настоящего времени не решено ни одной серьезной задачи, описывающей напряженное состояние после холодной пластической деформации, принципиальной невозможности таких решений не существует [16].

2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОМД

При разработке технологии обработки металлов давлением: проектировании режимов деформации, расчете нагрузок, допустимых напряжений, энергосиловых параметров необходимо знать и уметь применять различные методики расчета, позволяющие оценивать параметры технологических процессов с высокой точностью и достоверностью. Методик и формул для расчета технологических параметров процессов множество. Рассмотрим некоторые из них на примере решения задач.

2.1. Аппроксимация кривых упрочнения

Задание

Аппроксимировать кривые упрочнения при горячей деформации сплава Л70 методом функций термомеханических коэффициентов:

$$\sigma_s = \sigma_0 K_\varepsilon K_u K_t, \quad (1)$$

где σ_0 – базисное значение сопротивления деформации; K_ε – функция степени деформации; K_u – функция скорости деформации; K_t – функция температуры деформации.

Определить точность аппроксимации σ_s для какой либо точки на графиках, удаленной от точки базисного значения.

Даны кривые упрочнения при горячей деформации сплава Л70 для четырех различных скоростей деформации u и четырех различных температур t (рис. 23). Известно, что $u_1=18 \text{ с}^{-1}$; $u_2=6 \text{ с}^{-1}$; $u_3=1,8 \text{ с}^{-1}$; $u_4=0,4 \text{ с}^{-1}$, а также, что $t_1=450^\circ\text{C}$; $t_2=600^\circ\text{C}$; $t_3=750^\circ\text{C}$; $t_4=900^\circ\text{C}$. Известно значение базисного сопротивления деформации $\sigma_0 = 58 \text{ МПа}$ (жирная точка на графике).

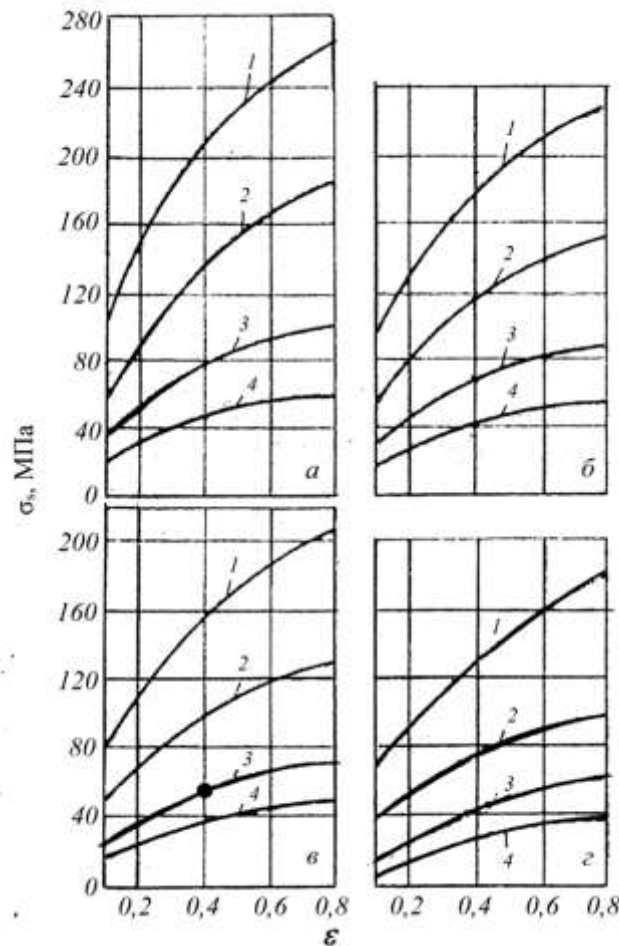


Рис. 23. Кривые деформационного упрочнения латуни Л70:
 $a - 18 \text{ с}^{-1}$; $б - 6 \text{ с}^{-1}$; $в - 1,8 \text{ с}^{-1}$; $г - 0,4 \text{ с}^{-1}$;
 $1 - 450^\circ\text{C}$; $2 - 600^\circ\text{C}$; $3 - 750^\circ\text{C}$; $4 - 900^\circ\text{C}$

Известны виды кривых функций K_ε , K_u и K_t :

$$K_\varepsilon = a_0 + a_1 \varepsilon^{a_2}; \quad (2)$$

$$K_u = a_3 + a_4 \ln u; \quad (3)$$

$$K_t = a_5 + a_6 t. \quad (4)$$

Решение

Базисное значение сопротивления деформации это величина сопротивления деформации, полученная при начальных условиях:

$$\sigma_s \Big|_{\substack{\varepsilon=\varepsilon_0 \\ u=u_0 \\ t=t_0}} = \sigma_0 = 58. \quad (5)$$

Анализируя выражения (1) и (5) можно установить, что

$$K_\varepsilon \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_0} = 1; \quad (6)$$

$$K_u \Big|_{u=u_0} = 1; \quad (7)$$

$$K_t \Big|_{t=t_0} = 1. \quad (8)$$

Нетрудно установить, что для каждой из функций K_ε , K_u и K_t соблюдаются следующие уравнения:

$$K_\varepsilon \Big|_{\substack{u=u_0 \\ t=t_0}} = \frac{\sigma_s}{\sigma_0}; \quad (9)$$

$$K_u \Big|_{\substack{\varepsilon=\varepsilon_0 \\ t=t_0}} = \frac{\sigma_s}{\sigma_0}; \quad (10)$$

$$K_t \Big|_{\substack{\varepsilon=\varepsilon_0 \\ u=u_0}} = \frac{\sigma_s}{\sigma_0}. \quad (11)$$

Воспользуемся имеющимися кривыми упрочнения, уравнениями (9), (10) и (11), а также (2), (3) и (4) и составим следующие системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a_0 + 0,4^{a_2} \cdot a_1 &= 1 \\ a_0 + 0,6^{a_2} \cdot a_1 &= \frac{68}{58} = 1,17 \\ a_0 + 0,8^{a_2} \cdot a_1 &= \frac{73}{58} = 1,25 \end{aligned} \right\}; \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} a_3 + a_4 \ln 1,8 &= 1 \\ a_3 + a_4 \ln 18 &= \frac{80}{58} = 1,38 \end{aligned} \right\}; \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} a_5 + a_6 750 &= 1 \\ a_5 + a_6 450 &= \frac{160}{58} = 2,76 \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Систему уравнений (12) удобно решать графически, а системы (13) и (14) – методом подстановки. В результате решения трех систем имеем:

$$K_\varepsilon = 1,45 - 0,15\varepsilon^{-1,17}; \quad (15)$$

$$K_u = 0,91 + 0,16 \ln u; \quad (16)$$

$$K_t = 5,43 + 0,0059t. \quad (17)$$

Построим графики функций K_ε , K_u и K_t , используя выражения (15), (16) и (17). Графики функций K_ε , K_u и K_t приведены на рис. 24, рис. 25 и рис. 26 соответственно.

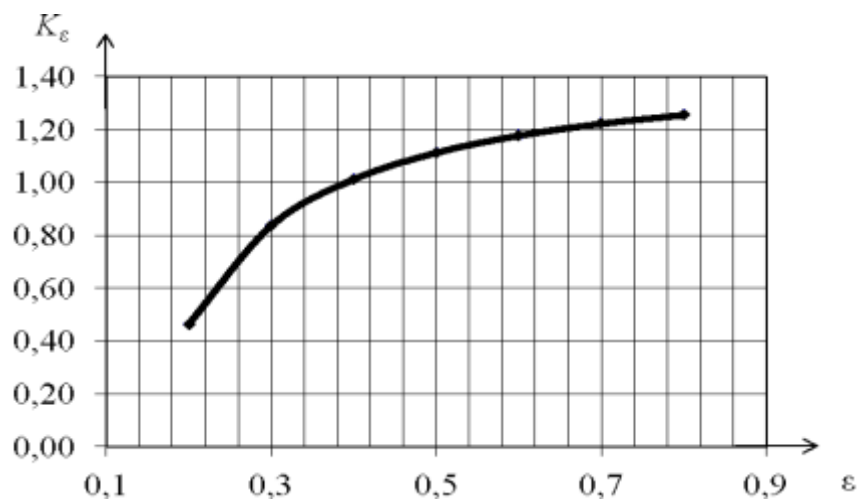


Рис. 24. График функции $K_\varepsilon = f(\varepsilon)$

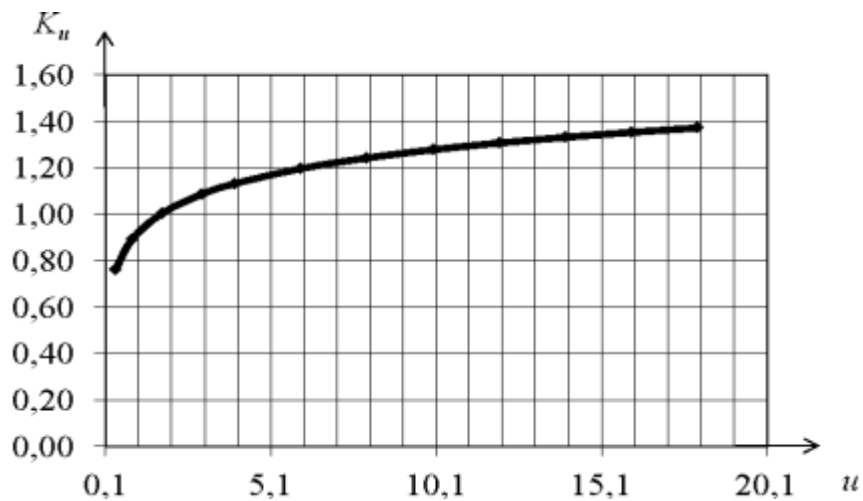


Рис. 25. График функции $K_u = f(u)$

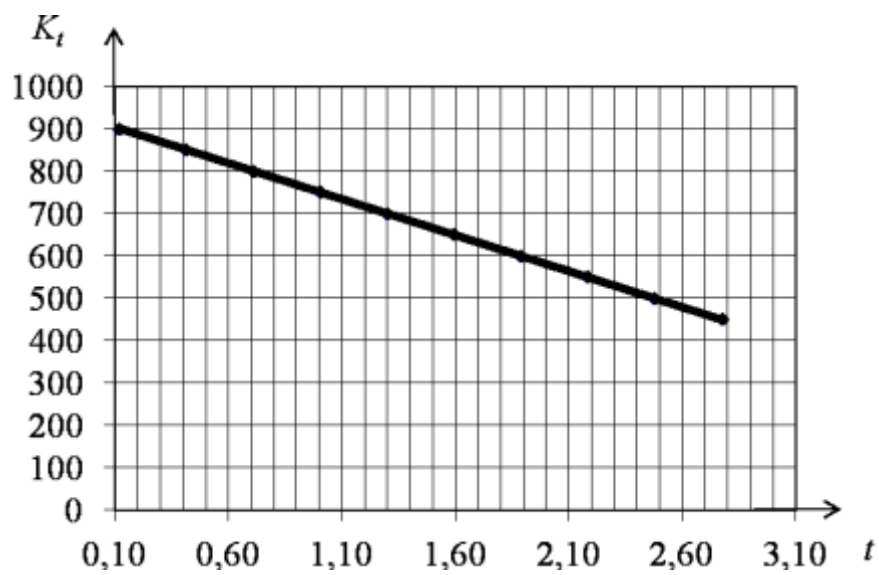


Рис. 26. График функции $K_t = f(t)$

Подставим выражения (15), (16) и (17) в формулу (1) и запишем окончательное аналитическое выражение для кривых упрочнения.

$$\sigma_s = \sigma_0 \cdot (1,45 - 0,15 \cdot \varepsilon^{-1,17}) \cdot (0,91 + 0,16 \ln u) \cdot (5,43 - 0,0059t). \quad (18)$$

Проверим точность аппроксимации. Вычислим значение σ_s в точке удаленной от базисного значения σ_0 , например при $\varepsilon = 0,6$, $t = 600$ °С, и $u = 18$ с⁻¹ по формуле (18).

$$\begin{aligned} \sigma_s &= 58 \cdot (1,45 + 0,15 \cdot 0,6^{-1,17}) \cdot (0,91 + 0,16 \ln 18) \times \\ &\times (5,43 - 0,0059 \cdot 600) = 177,13 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Сравним полученное по формуле значение с величиной σ'_s , которую определим непосредственно по графику. Получим $\sigma'_s = 168$ МПа. Определим расхождение между полученными значениями n , % следующим образом:

$$n = \frac{\sigma_s - \sigma'_s}{\sigma_s} \cdot 100\% = 5\%. \quad (19)$$

Согласно выражению (19) погрешность аппроксимации составляет 5%, что является удовлетворительным результатом для инженерных вычислений.

2.2. Расчет режима обжатий при волочении проволоки

Задание

Рассчитать режим обжатий при волочении проволоки из сплава АМг1 с диаметра $d_0 = 6$ мм до конечного диаметра $d_k = 2,5$ мм без промежуточных отжигов с обеспечением в каждом проходе заданного коэффициента запаса прочности

$$K_{zi} = \frac{\sigma_{si}}{p_{bi}} = 2,5, \quad (20)$$

где σ_{si} – сопротивление деформации сплава после i -го прохода;
 p_{bi} – напряжение волочения в i -м проходе.

Кривые упрочнения сплава АМг1 приведены на рис. 27.

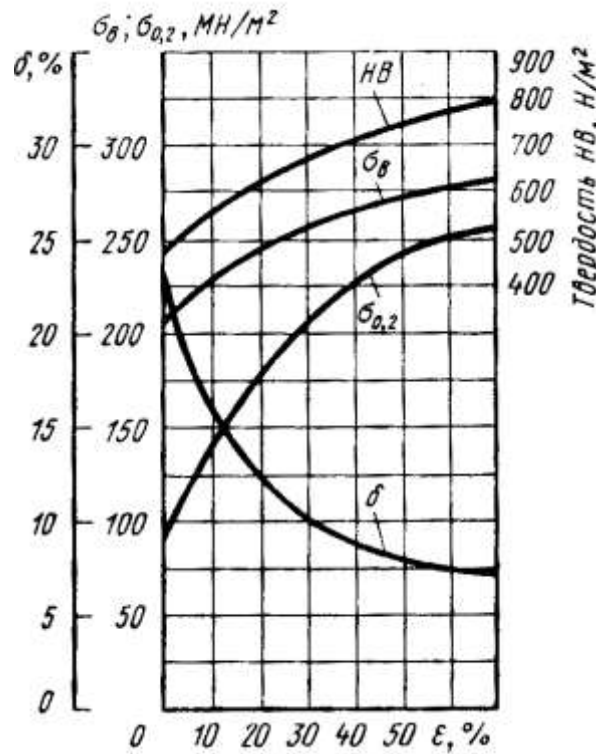


Рис. 27. Кривые упрочнения сплава АМг1

Напряжение волочения p_{vi} определяется по формуле

$$p_{vi} = \frac{\sigma_{s(i-1)}}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{3} \varepsilon_i \frac{m + K_i}{m + 1} + \frac{2}{3} a (K_i + 1) + \psi \varepsilon_i \frac{1 + a^2}{a} \right], \quad (21)$$

где ε_i – обжатие в i -м проходе ($\varepsilon_i = 2 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right)$, здесь d_i – диаметр проволоки после i -го прохода); m – коэффициент аппроксимации заданной кривой упрочнения сплава; $K_i = \frac{\sigma_{si}}{\sigma_{s(i-1)}}$ – коэффициент упрочнения металла проволоки в i -м проходе; a – тангенс угла наклона рабочего конуса волокна ($a = \tan \alpha = 0,12$); ψ – коэффициент трения ($\psi = 0,1$).

рочнения металла проволоки в i -м проходе; a – тангенс угла наклона рабочего конуса волокна ($a = \tan \alpha = 0,12$); ψ – коэффициент трения ($\psi = 0,1$).

Решение

Запишем уравнение (21) решения задачи используя формулу для коэффициента запаса прочности (20), получим

$$\frac{\sigma_{si}}{K_{zi}} = \frac{\sigma_{s(i-1)}}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{3} \varepsilon_i \frac{m + K_i}{m + 1} + \frac{2}{3} a (K_i + 1) + \psi \varepsilon_i \frac{1 + a^2}{a} \right].$$

Подставим в эту формулу известные величины, тогда

$$\frac{\sigma_{s(i-1)}}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{3} \cdot 2 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \frac{m + \frac{\sigma_{si}}{\sigma_{s(i-1)}}}{m+1} + \frac{2}{3} \cdot 0,12 \left(\frac{\sigma_{si}}{\sigma_{s(i-1)}} + 1 \right) + \right. \\ \left. + 0,1 \cdot 2 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \frac{1 + 0,12^2}{0,12} \right] = \frac{\sigma_{si}}{2,5}. \quad (22)$$

Кривая упрочнения на рис. 27 построена в координатах $\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2}(\varepsilon')$, где ε' - линейная степень деформации ($\varepsilon' = \frac{\Delta h}{h_0}$), поэтому необходимо перестроить ее в логарифмических координатах для возможности оценивания накопленной степени деформации. Для этого перестроим ось абсцисс в соответствии с формулой перевода: $\varepsilon_i = \ln \left(\frac{1}{1 - \varepsilon'_i} \right)$. Значения по оси ординат при этом останутся неизменными. Найдем коэффициент m , аппроксимируя полученную кривую упрочнения в виде:

$$\sigma_{si} = \sigma_{s0} + n\varepsilon^m. \quad (23)$$

Для этого составим систему уравнений

$$\begin{cases} 100 + n \cdot 0,51^m = 225 \\ 100 + n \cdot 0,22^m = 175. \end{cases} \quad (24)$$

Решая систему (24) найдем, что $m = 0,6$, а $n = 187$. Имеем аналитическую запись кривой упрочнения

$$\sigma_s = 100 + 187 \cdot \varepsilon^{0,6}. \quad (25)$$

Построим полученную кривую упрочнения (рис. 28).

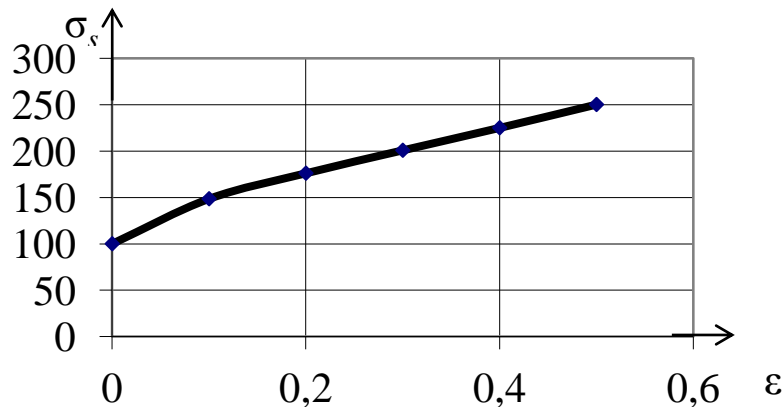


Рис. 28. Полученная кривая упрочнения сплава АМг1

Перепишем формулу (22) с учетом того, что $m = 0,6$.

$$\frac{\sigma_{s(i-1)}}{\sqrt{3}} \left[3,46 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \frac{0,6\sigma_{s(i-1)} + \sigma_{si}}{1,6\sigma_{s(i-1)}} + \right. \\ \left. + 0,08 \left(\frac{\sigma_{si}}{\sigma_{s(i-1)}} + 1 \right) + 1,69 \cdot \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \right] = \frac{\sigma_{si}}{2,5}. \quad (26)$$

Неизвестной и искомой величиной является d_i . Поскольку σ_{si} зависит от искомой величины d_i и связана с ней выражением (25) через степень деформации, то имеет смысл переписать уравнение (26) в следующем виде:

$$\frac{\sigma_{s(i-1)}}{\sqrt{3}} \left[3,46 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \frac{0,6\sigma_{s(i-1)} + \left(100 + 187 \cdot \left(2 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \right)^{0,6} \right)}{1,6\sigma_{s(i-1)}} + \right. \\ \left. + 0,08 \left(\frac{100 + 187 \cdot \left(2 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \right)^{0,6}}{\sigma_{s(i-1)}} + 1 \right) + 1,69 \cdot \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \right] = \\ = \frac{100 + 187 \cdot \left(2 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \right)^{0,6}}{2,5}. \quad (27)$$

Рассчитаем режим обжатий, используя формулу (27). Для первого обжатия имеем $d_{(i-1)} = 6$ мм, $\sigma_{s(i-1)} = \sigma_{s0} = 100$ МПа. Подставим эти значения в формулу (27) и решим полученное уравнение относительно d_i . Удобнее всего решать уравнение такое уравнение графически.

Решая уравнение (27) получаем $d_1 = 5,1$ мм. Таким образом, первое обжатие проволоки должно произойти на 0,9 мм.

Аналогичным образом по формуле (27) определим значение второго обжатия, для которого $d_{(i-1)} = 5,1$ мм, а рассчитанное по формуле (6) сопротивление деформации $\sigma_{s(i-1)} = 195$ МПа. Получим $d_1 = 4,7$ мм.

Необходимо помнить, что при холодной деформации степень деформации накапливается с каждым проходом, поэтому при расчете $\sigma_{s(i-1)}$ нужно каждый раз подставлять в формулу (25) суммарную степень деформацию, накопленную за $i-1$ проходов.

Аналогичным образом рассчитываются все остальные проходы. В каждом проходе кроме последнего коэффициент запаса прочности составляет 2,5.

Для последнего прохода при решении уравнения (27) получим диаметр проволоки $d_i < 2,5$ мм. В этом случае принимаем $d_i = 2,5$ мм и данный проход считаем последним.

Рассчитанный маршрут волочения условно представлен на рис. 29.

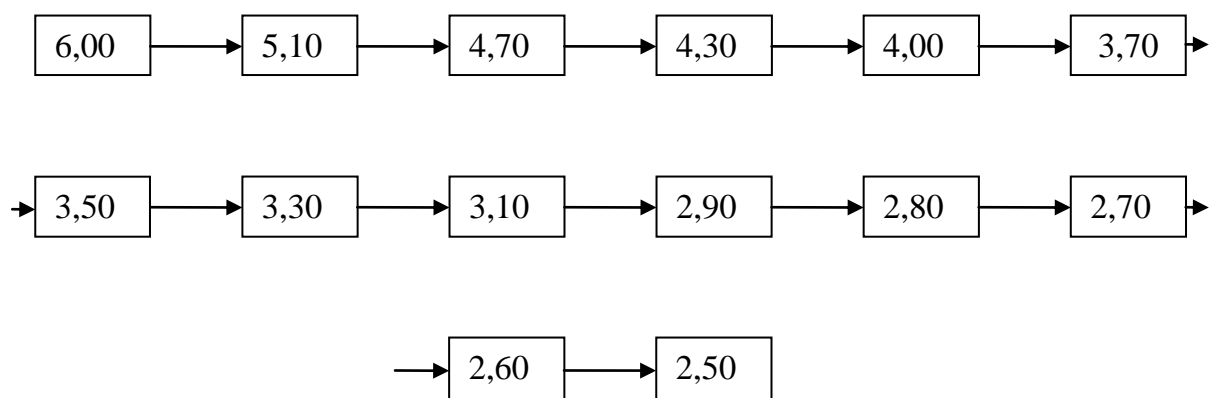


Рис. 29. Маршрут волочения проволоки из сплава АМг1 с диаметра 6 мм до диаметра 2,5 мм

2.3. Расчет мощности волочения с относительным противонатяжением

Задание

Сопоставить мощность волочения проволоки из алюминиевого сплава АМг1 без противонатяжения и с относительным противонатяжением S . Противонатяжение действует во всех проходах кроме первого.

$$S = \frac{q_{i-1}}{\sigma_{s(i-1)}} = 0,5, \quad (28)$$

где q_{i-1} – напряжение противонатяжения в i -м проходе.

Маршрут волочения приведен на рис. 30.

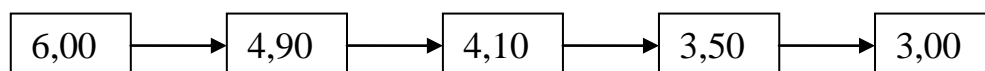


Рис. 30. Маршрут волочения

Напряжение волочения без противонатяжения в i -м проходе p_{bi} определяется по формуле

$$p_{bi} = \frac{\sigma_{s(i-1)}}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{3} \varepsilon_i \frac{m + K_i}{m + 1} + \frac{2}{3} a (K_i + 1) + \psi \varepsilon_i \frac{1 + a^2}{a} \right], \quad (29)$$

где ε_i – обжатие в i -м проходе ($\varepsilon_i = 2 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right)$, здесь d_i – диаметр проволоки после i -го прохода); m – коэффициент аппроксимации заданной кривой упрочнения сплава; $K_i = \frac{\sigma_{si}}{\sigma_{s(i-1)}}$ – коэффициент упрочнения металла проволоки в i -м проходе; a – тангенс угла наклона рабочего конуса волюки ($a = \tan \alpha = 0,12$); ψ – коэффициент трения ($\psi = 0,1$).

Напряжение волочения с противонатяжением p_{vni} определяется по следующей формуле:

$$p_{vni} = p_{bi} \cdot \left(1 - S_0 \frac{\lambda_i}{K_i} \right) + S_0 \sigma_{s(i-1)} \lambda_i, \quad (30)$$

где λ_i – коэффициент вытяжки в i -м проходе ($\lambda_i = \frac{d_{i-1}^2}{d_i^2}$).

Скорость волочения в последнем проходе $v_4 = 10$ м/с.

Решение

Найдем скорости волочения в каждом проходе. Для этого рассчитаем коэффициенты обжатий в каждом проходе по формуле

$$\lambda_i = \frac{d_{i-1}^2}{d_i^2}. \quad (31)$$

Полученные результаты занесем в табл. 5. Поскольку нам известно, что $v_4 = 10$ м/с, то возможно найти v_0 следующим образом:

$$v_0 = \frac{v_4}{\prod_{i=1}^4 \lambda_i}. \quad (32)$$

Найдя значение v_0 , нетрудно найти остальные скорости :

$$v_i = v_{(i-1)} \cdot \lambda_i. \quad (33)$$

Таблица 5

Таблица значений скоростей волочения

| параметры | <i>i</i> | | | | |
|-------------|----------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| v_i , м/с | 2,5 | 3,7 | 5,3 | 7,4 | 10,0 |
| λ_i | 1 | 1,50 | 1,43 | 1,40 | 1,36 |

Аппроксимировав кривую упрочнения, получим формулу (25).

Поскольку первый проход проходит без противонапряжения, напряжение волочения в нем рассчитывается по формуле (29). Для первого прохода имеем $d_{(i-1)} = 6$ мм, $d_i = 4,9$ мм, $\sigma_{s(i-1)} = 100$ МПа. Подставим все известные величины в формулу (29), получим

$$p_{bi} = 57,8 \left[3,46 \ln \left(\frac{6}{4,9} \right) \cdot \frac{60 + 100 + 187 \cdot \left(2 \ln \left(\frac{6}{4,9} \right) \right)^{0,6}}{160} + \right. \\ \left. + 0,07 \left[\frac{100 + 187 \cdot \left(2 \ln \left(\frac{6}{4,9} \right) \right)^{0,6}}{100} + 1 \right] + 2,02 \cdot \ln \left(\frac{6}{4,9} \right) \right] = 104 \text{ МПа.}$$

Рассчитаем силу волочения P_i по известной формуле

$$P_i = p_{bi} \cdot F_i, \quad (34)$$

где $F_i = \pi \left(\frac{d_i}{2} \right)^2$ – площадь поперечного сечения проволоки после i -го прохода. Таким образом, усилие волочения в первом проходе

$$P_1 = p_{b1} \cdot F_1 = 104 \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{4,9}{2} \right)^2 = 1963 \text{ Н.} \quad (35)$$

Мощность волочения в первом проходе найдем по следующей формуле:

$$N_i = v_i P_i. \quad (36)$$

Получим $N_1 = 1979 \cdot 3,7 = 7,2$ кВт.

Рассчитаем мощности волочения проволоки в остальных проходах, для начала без противонапряжения $N_{\text{бп}i}$. Имеем:

$$N_{\text{бп}i} = \frac{\sigma_{s(i-1)}}{\sqrt{3}} \left[3,46 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \cdot \frac{0,6 \cdot \sigma_{s(i-1)} + 100 + 187 \cdot \left(2 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \right)^{0,6}}{1,6 \cdot \sigma_{s(i-1)}} + \right. \\ \left. + 0,07 \left(\frac{100 + 187 \cdot \left(2 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \right)^{0,6}}{\sigma_{s(i-1)}} + 1 \right) + 2,02 \cdot n \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right) \cdot \pi \left(\frac{d_i}{2} \right)^2 \cdot v_i \right] \quad (37)$$

Определим мощность волочения без противонапряжения во втором проходе. Для него сопротивление деформации, рассчитанное по формуле (25), $\sigma_{s(i-1)} = 209$ МПа. Подставим все известные величины в формулу (37), получим

$$N_{\text{бп}2} = 121 \cdot \left[3,46 \ln \left(\frac{6}{4,1} \right) \cdot \frac{125 + 100 + 187 \cdot \left(2 \ln \left(\frac{6}{4,1} \right) \right)^{0,6}}{334} + \right. \\ \left. + 0,07 \left(\frac{100 + 187 \cdot \left(2 \ln \left(\frac{6}{4,1} \right) \right)^{0,6}}{209} + 1 \right) + 2,02 \cdot \ln \left(\frac{6}{4,1} \right) \right] \times \\ \times 3,14 \left(\frac{4,1}{2} \right)^2 \cdot 0,85 = 20,5 \text{ кВт}. \quad (38)$$

Аналогичным образом найдем мощность волочения без противонапряжения в третьем и четвертом проходах. $N_{\text{бп}3} = 33,8$ кВт; $N_{\text{бп}4} = 49,6$ кВт.

Суммарная мощность при волочении проволоки без противонапряжения $N_{\text{бп}\Sigma} = 111,1$ кВт.

Рассчитаем мощности волочения с противонапряжением для второго, третьего и четвертого проходов, используя формулы (30) и (36):

$$N_{\text{сп}i} = \left(p_{\text{в}i} \cdot \left(1 - S \frac{\lambda_i}{K_i} \right) + S \sigma_{s(i-1)} \lambda_i - S \cdot \sigma_{si} \right) \cdot \pi \left(\frac{d_i}{2} \right)^2 \cdot v_i. \quad (39)$$

Для второго прохода $\lambda_i = 1,43$, $\sigma_{si} = 247$ МПа, $\sigma_{s(i-1)} = 209$ МПа, $K_i = 1,24$, $v_i = 5,3$ м/с.

Тогда в соответствии с формулой (39):

$$N_{\text{сп}2} = \left(295,2 \cdot \left(1 - 0,5 \frac{1,43}{1,24} \right) + 0,5 \cdot 209 - 0,5 \cdot 247 \right) \cdot 2,14 \cdot 13,2 \cdot 5,3 = 10,4 \text{ кВт}$$

Для третьего прохода $\lambda_i = 1,40$, $\sigma_{si} = 296$ МПа, $\sigma_{s(i-1)} = 247$ МПа, $K_i = 1,20$, $v_i = 7,4$ м/с. Для него

$$N_{\text{сп}3} = \left(477,2 \cdot \left(1 - 0,5 \frac{1,4}{1,20} \right) + 0,5 \cdot 247 \cdot 1,4 - 0,5 \cdot 296 \right) \cdot 9,6 \cdot 7,7 = 15,8 \text{ кВт}$$

Для последнего четвертого прохода $\lambda_i = 1,36$, $\sigma_{si} = 327$ МПа, $\sigma_{s(i-1)} = 296$ МПа, $K_i = 1,11$, $v_i = 10$ м/с. Для него

$$N_{\text{сп}4} = \left(702 \cdot \left(1 - 0,5 \frac{1,36}{1,11} \right) + 0,5 \cdot 296 \cdot 1,36 - 0,5 \cdot 327 \right) \cdot 7,1 \cdot 10 = 21,8 \text{ кВт}$$

Суммарная мощность при волочении проволоки с противонатяжением $N_{\text{сп}\Sigma} = 55,2$ кВт, что меньше значения мощности волочения без противонатяжения почти на 50%.

2.4. Определение зависимости энергосиловых параметров от скорости прокатки

Задание

Установить зависимость работы прокатки A_{Σ} от скорости полосы на выходе из последней клетки v_4 . Рассмотреть три случая: $v_4 = 0,5$; $v_4 = 2,0$; $v_4 = 10,0$ м/с.

Маршрут прокатки приведен на рис. 31.

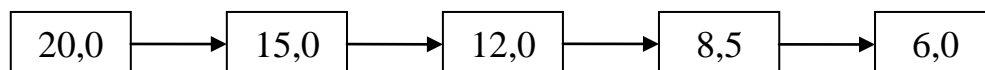


Рис. 31. Маршрут прокатки полосы

Материал заготовки – сталь X18H19T. Кривые деформационного упрочнения стали X18H19T приведены на рис. 32.

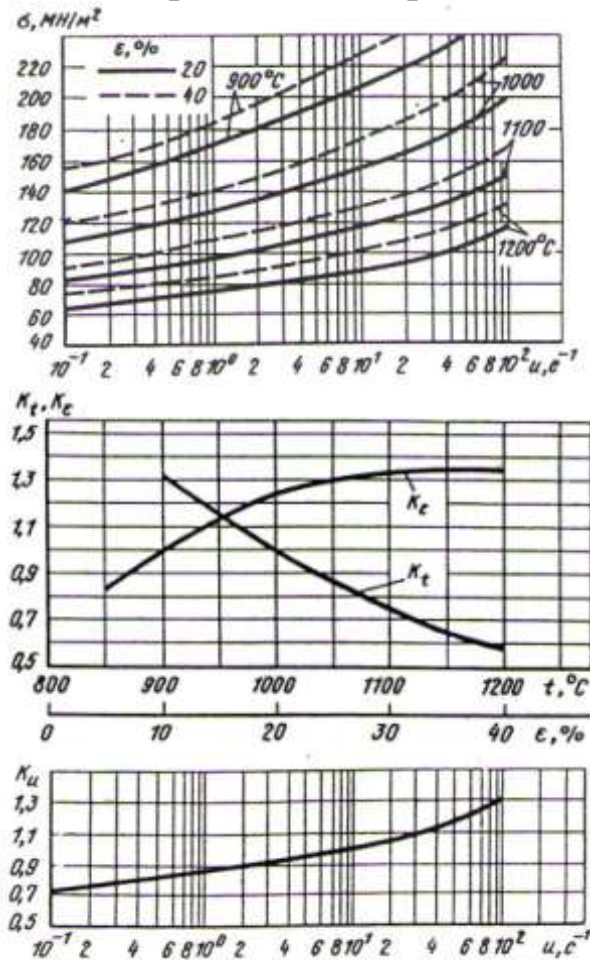


Рис. 32. Кривые деформационного упрочнения стали X18H19T

Размеры заготовки перед прокаткой: $L_0 = 1450$ мм; $B_0 = 570$ мм; $h_0 = 20$ мм. Диаметр валков $D = 305$ мм.

Работа прокатки определяется по формуле

$$A_i = M_i \varphi_i, \quad (40)$$

где φ_i – угол поворота валка в i -м проходе, M_i – момент прокатки в i -м проходе.

Угол поворота валка определяется по формуле

$$\varphi_i = L_i(1 - S_i)/R, \quad (41)$$

где L_i – длина полосы после i -го прохода; S_i – опережение в i -м проходе; R – радиус валка.

Величина опережения рассчитывается по формуле

$$S_i = \gamma_i^2 \frac{R}{h_i},$$

где γ_i – нейтральный угол в i -м проходе ($\gamma_i = \frac{\alpha_i}{2} \left(1 - \frac{\alpha_i}{2\mu} \right)$, здесь α_i – угол захвата полосы в i -м проходе ($\alpha_i = \sqrt{\frac{\Delta h_i}{R}}$), Δh_i – абсолютное обжатие в i -м проходе ($\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$), μ – коэффициент трения во всех клетях ($\mu = 0,25$)).

Момент прокатки определяется по формуле

$$M_i = 2P_i \psi l_i, \quad (42)$$

где P_i – усилие прокатки в i -м проходе; ψ – коэффициент плеча ($\psi = 0,35 - 0,40$); l_i – длина зоны обжатия в i -м проходе ($l_i = \sqrt{\Delta h_i R}$).

Усилие прокатки определяется формулой

$$P_i = \bar{p}_i l_i B_0, \quad (43)$$

где \bar{p}_i – среднее давление металла на валки в i -м проходе, определяемое следующим образом:

$$\text{при } l/h_{cp} < 1 \quad \bar{p}_i = 1,25\sigma_{si} \left(\ln \frac{h_{cpi}}{l_i} + \frac{l_i}{h_{cpi}} - 0,2 \right); \quad (44)$$

$$\text{при } l/h_{cp} \geq 1 \quad \bar{p}_i = \sigma_{si} \left(1 + \frac{R\alpha_i}{2h_{cpi}} \left[\mu - \alpha_i \left(\frac{1}{3} + \frac{\alpha_i}{4\mu} \right) \right] \right), \quad (45)$$

где h_{cpi} – средняя высота очага деформации в i -м проходе ($h_{cpi} = \frac{h_{i-1} + h_i}{2}$); σ_{si} – сопротивление металла деформации после i -го прохода.

Сопротивление металла деформации после i -го прохода определяется методом термомеханических коэффициентов по формуле

$$\sigma_{si} = \sigma_0 K_\varepsilon K_u K_t. \quad (46)$$

Решение

Найдем скорости прокатки в каждом проходе, для трех случаев. Воспользуемся законом постоянства секундных объемов, который записывается следующим образом:

$$F_i v_i = \text{const}, \quad (47)$$

где F_i – поперечная площадь полосы после i -го прохода; v_i – скорость прокатки после i -го прохода.

Поскольку прокатка ведется без уширения, уравнение (47) примет вид $B_0 h_0 = \text{const}$. Для $v_4 = 0,5$ м/с имеем:

$$v_0 \cdot 20 \cdot 570 = v_1 \cdot 15 \cdot 570 = v_2 \cdot 12 \cdot 570 = v_3 \cdot 8,5 \cdot 570 = 0,5 \cdot 6 \cdot 570. \quad (48)$$

Из выражения (48) найдем v_i для всех проходов. Аналогичным образом составим и решим уравнения для двух других скоростей выхода полосы из последней клетки и занесем данные в табл. 6.

Таблица 6

Таблица значений скоростей прокатки

| Скорость в последней клетки v_4 , м/с | Скорость в клетях стана v_i , м/с | | | |
|--|-------------------------------------|------|------|------|
| | Номер клетки i | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 10,00 | 3,00 | 4,00 | 5,00 | 7,06 |
| 2,00 | 0,60 | 0,80 | 1,00 | 1,41 |
| 0,50 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,35 |

Рассчитаем скорости валков по формуле

$$v_{bi} = \frac{v_i}{S_i + 1}. \quad (49)$$

Найдем величину опережения следующим образом:

$$S_i = \left(\frac{\sqrt{\frac{h_{i-1} - h_i}{152,5}}}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{h_{i-1} - h_i}{152,5}}}{2 \cdot 0,25} \right) \right)^2 \frac{152,5}{h_i}. \quad (50)$$

Результаты вычислений занесем в табл. 7

Таблица 7

Таблица значений опережения

| Параметр | Номер прохода i | | | |
|-----------------|-------------------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| h_{i-1} , мм | 20 | 15 | 12 | 8,5 |
| h_i , мм | 15 | 12 | 8,5 | 6 |
| Δh , мм | 5 | 3 | 3,5 | 2,5 |
| α_i | 0,18 | 0,14 | 0,15 | 0,13 |
| γ_i | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| S_i | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,06 |

Значения скоростей валков, найденные по формуле (49) для различных скоростей выхода полосы из последней клетки, занесем в табл. 8, при этом значения скоростей валков в ячейках таблицы 8 соответствуют значениям скоростей прокатки в соответствующих ячейках таблицы 6.

Таблица 8

Таблица значений скоростей вращения валков

| Скорость в последней клетки v_4 , м/с | Скорость в клетях стана v_{Bi} , м/с | | | |
|--|--|------|------|------|
| | Номер клетки i | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 10,00 | 3,87 | 4,84 | 6,72 | 9,45 |
| 2,00 | 0,77 | 0,97 | 1,34 | 1,89 |
| 0,50 | 0,19 | 0,24 | 0,33 | 0,47 |

Для расчета сопротивления металла деформации после i -го прохода σ_{si} по формуле (46), необходимо определить коэффициенты K_ε , K_u и K_t . Они определяются графическим методом (рис. 32) при средней температуре в проходе t_i , степени деформации $\varepsilon_i = (h_{i-1} - h_i)/h_{i-1}$ и скорости деформации $u_i = v_i \varepsilon_i / l_i$.

Средняя температура в i -м проходе определяется по формуле

$$t_i = t_{i-1} - \Delta t_i = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0255\Pi_i}{\omega_i} \cdot \tau_i + \left(\frac{1000}{t_{i-1} + \Delta t_{gi} + 273}\right)^3}} + 273, \quad (51)$$

где Δt_i – изменение температуры в i -м проходе; Π_i – периметр сечения полосы после i -го прохода; ω_i – площадь сечения полосы после i -го прохода; τ_i – длительность прохода и паузы; Δt_{gi} – изменение температуры металла за счет деформации в i -м проходе ($\Delta t_{gi} = 0,183\sigma_{si} \ln \lambda_i$, здесь λ_i – коэффициент вытяжки в i -м проходе).

Длительность прохода и паузы рассчитаем по формуле

$$\tau_i = \tau_{\text{маш}} + \tau_{\text{пз}} = \frac{L_i}{v_{Bi}} + \frac{L_M}{v_i}, \quad (52)$$

где $\tau_{\text{маш}}$ – машинное время; $\tau_{\text{пз}}$ – время паузы; L_i – длина полосы после i -го прохода; L_M – расстояние между клетями стана ($L_M = 2$ м).

Длина полосы после i -го прохода определяется из условия постоянства объема

$$L_i = \frac{L_0 B_0 h_0}{B_i h_i} = \frac{L_0 h_0}{h_i} = L_0 \lambda_i. \quad (53)$$

Сведем в табл. 4 значения длительностей проходов для различных скоростей выхода полосы из последней клетки, при этом значения длительностей проходов в ячейках таблицы 9 соответствуют значениям скоростей прокатки в соответствующих ячейках таблицы 6.

Таблица 9

Таблица значений длительности проходов

| Скорость в последней клетки v_4 , м/с | Длительность проходов τ_i , с | | | |
|--|------------------------------------|------|------|------|
| | Номер прохода i | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 10,00 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 |
| 2,00 | 5,0 | 4,5 | 4,0 | 3,6 |
| 0,50 | 20,0 | 18,0 | 15,9 | 14,2 |

Определим значения коэффициентов K_ε и K_u графически и представим результаты в виде таблиц.

Поскольку график $K_\varepsilon = K_\varepsilon(\varepsilon)$ построен только для степеней деформации от 0 до 40% (рис. 32), аппроксимируем данную кривую. Перед аппроксимацией процентную шкалу необходимо перевести в логарифмическую по формуле

$$\varepsilon_i = 2 \ln \left(\frac{d_{(i-1)}}{d_i} \right),$$

где ε_i' – линейная степень деформации, ε_i – логарифмическая степень деформации.

Приведем в табл. 10 значения логарифмических степеней деформации после перевода.

Таблица 10

Таблица значений ε_i и ε_i'

| Номер прохода i | Степень деформации | |
|-------------------|--------------------|-----------------|
| | ε_i' | ε_i |
| 1 | 0,22 | 0,25 |
| 2 | 0,41 | 0,53 |
| 3 | 0,62 | 0,96 |
| 4 | 0,81 | 1,65 |

После приведения зависимости K_ε к логарифмическому виду можно аппроксимировать кривую степенной функцией:

$$K_\varepsilon = 7,6 - 6 \cdot \varepsilon_i^{-0,04}. \quad (54)$$

Аппроксимируем зависимости K_u и K_t линейными функциями:

$$K_u = 0,823 + 0,11 \cdot \ln u_i. \quad (55)$$

$$K_t = 4 - 0,003 \cdot t_i. \quad (56)$$

Определим σ_{si} для первой скорости выхода полосы из последней клетки $v_4 = 0,5$ м/с. Поскольку из уравнения (51) следует, что $K_t = f(\sigma_{si})$, то составим и решим в соответствии с формулой (46) уравнение относительно σ_{si} для четырех проходов.

Для первого прохода имеем: $K_u = 0,13$; $K_\varepsilon = 1,26$; $t_{i-1} = 1150^\circ\text{C}$; $\sigma_0 = 122 \text{ МПа}$; $\Pi = 1,170 \text{ м}$; $\omega_i = 0,009 \text{ м}^2$; $\tau = 20 \text{ с}$; $\ln \lambda_i = 0,29$.

$$\sigma_{si} = 122 \cdot 0,13 \cdot 1,26 \left(4 - 0,003 \left(\frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0255 \cdot 1,170}{0,009} \cdot 20 + \left(\frac{1000}{1150 + 0,183 \cdot 0,29 \cdot \sigma_{si} + 273} \right)^3}} + 273 \right) \right)$$

Решая это уравнение, получаем значение $\sigma_{s1} = 136 \text{ МПа}$ для скорости выхода полосы из последней клетки $v_4 = 0,5 \text{ м/с}$.

Аналогично рассчитаем σ_{si} для других проходов: $\sigma_{s2} = 159 \text{ МПа}$; $\sigma_{s3} = 187 \text{ МПа}$; $\sigma_{s4} = 270 \text{ МПа}$.

Таким же образом находим сопротивление металла деформации во всех проходах для двух других скоростей выхода полосы из последней клетки.

После нахождения всех значений сопротивления металла деформации, можно, найти средние давления металла на валки. Выберем одну из двух формул (44) и (45) для определения давления металла на валки, для этого определим соотношение $\frac{l_i}{h_{cpi}}$ в проходах.

Далее после нахождения среднего давления металла на валки найдем по формулам (42) и (43) момент и усилие прокатки.

Для нахождения работы прокатки найдем значения углов поворота валка по формуле (41): $\varphi_1 = 12,2$; $\varphi_2 = 15,3$; $\varphi_3 = 21,3$; $\varphi_4 = 29,9$. После этого по формуле (40) находим значения работы прокатки для всех проходов для трех скоростей выхода полосы из последней клетки. Найденные значения приведем в табл. 11.

Таблица 11

Таблица значений A_i

| Скорость в последней клетки v_4 , м/с | Значение A_i , кДж | | | |
|--|----------------------|-----|------|------|
| | Номер прохода i | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 10,00 | 372 | 453 | 1087 | 1652 |
| 2,00 | 386 | 529 | 1233 | 1836 |
| 0,50 | 220 | 392 | 1023 | 1567 |

Построим зависимость работы прокатки от скорости прокатки (рис. 33).

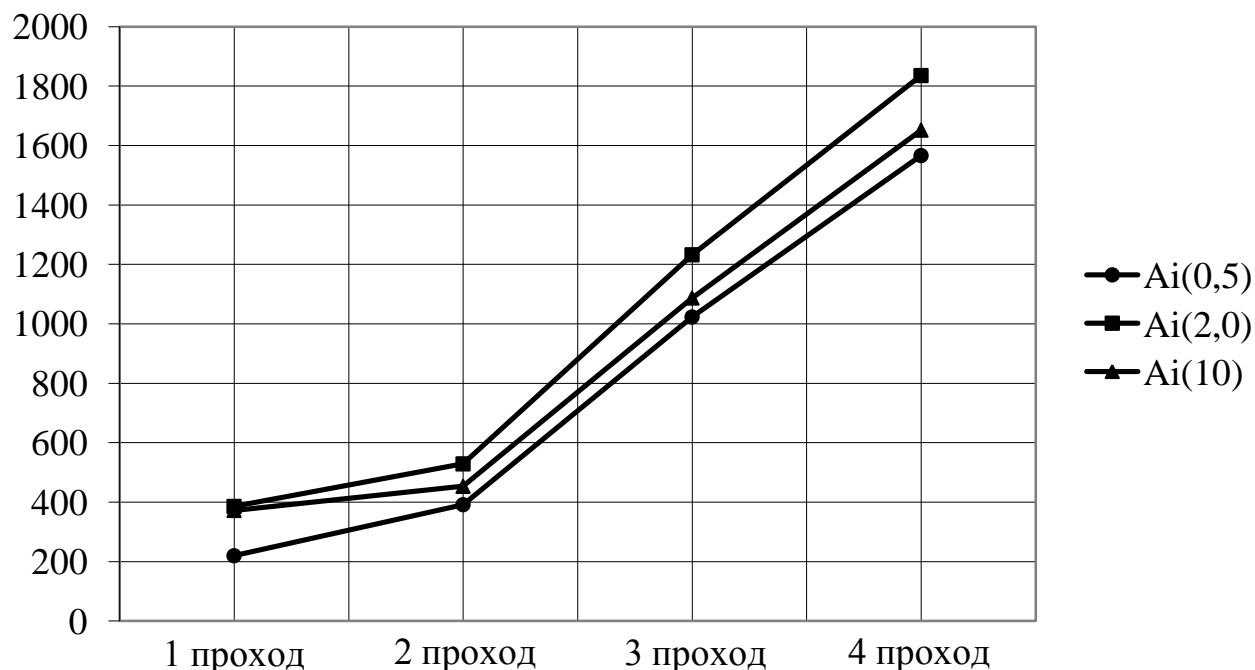


Рис. 33. Зависимость работы прокатки от скорости полосы на выходе из последней клетки

2.5. Расчет работы деформации при кузнечной протяжке

Задание

Определить полную работу деформации при протяжке заготовки квадратного сечения из латуни Л70 за один переход. Степень уковки во всех проходах одинакова: $U_i = \text{const}$. Размеры исходной заготовки $h_0 = b_0 = 250$ мм, конечные размеры $h_2 = b_2 = 180$ мм. Длина исходного бруса $L_0 = 2$ м. Сопротивление деформации латуни после отжига $\sigma_{s0} = 100$ МПа.

Степень деформации при обжатии рассчитывается следующим образом:

$$\varepsilon_i = 1 - \frac{1 - f_i}{2\Psi_i\phi_i} - \sqrt{\left(1 - \frac{1 - f_i}{2\Psi_i\phi_i}\right)^2 - 1 + \frac{1}{\Psi_i\phi_i}}, \quad (57)$$

где f_i — коэффициент бокового смещения, зависящий от величины относительной подачи S_i и фактора формы Ψ_i , то есть отношения высоты исходной заготовки к ее ширине ($\Psi_1 = \frac{h_{i-1}}{b_{i-1}}$); ϕ_1 — коэффициент

перехода, то есть отношение ширины заготовки после обжатия к ее высоте ($\varphi_i = \frac{b_i}{h_i}$).

Зависимости основных безразмерных параметров кузнечной протяжки приведены в табличном виде (табл. 12).

Таблица 12

Значения коэффициента бокового смещения в зависимости от величины относительной подачи и фактора формы

| S_i | f_i | |
|-------|----------------|----------------|
| | $\Psi_i = 0,5$ | $\Psi_i = 1,0$ |
| 0,5 | 0,22 | 0,19 |
| 0,7 | 0,26 | 0,27 |
| 1,0 | 0,31 | 0,37 |
| 1,4 | 0,38 | 0,48 |
| 1,8 | 0,44 | 0,56 |

Напряжение в конце обжатия рассчитывается по формуле

$$p_i = 1,15\sigma_{s_{i-1}} \left(1 + \frac{1}{6} \frac{h_{i-1}}{h_i} \right), \quad (58)$$

где $\sigma_{s_{i-1}}$ – сопротивление деформации металла перед обжатием; h_{i-1} и h_i – высота заготовки до и после обжатия соответственно.

Среднее усилие обжатия рассчитывается по формуле

$$\bar{P}_i = \frac{P_i^{\max} + P_i^{\min}}{2}, \quad (59)$$

где P_i^{\max} – максимальное усилие при обжатии; P_i^{\min} – минимальное усилие при обжатии.

Работа протяжки рассчитывается, как суммарная работа всех обжатий:

$$A_{i\Sigma} = \sum_{i=1}^n \bar{P}_i (h_{i-1} - h_i) n_i, \quad (60)$$

где n – число обжатий.

Решение

Переход включает в себя два прохода. В первом проходе квадратная заготовка обжимается по всей длине с подачей S_1 , затем она кантуется на 90° , и во втором проходе обжимается по всей длине с подачей S_2 . Обозначим размеры промежуточного сечения заготовки (после первого прохода) h'_1 и b'_1 . Перед вторым проходом заготовка кан-

туется на 90° и размеры h'_1 и b'_1 . переходят в b_1 и h_1 соответственно (рис. 34).

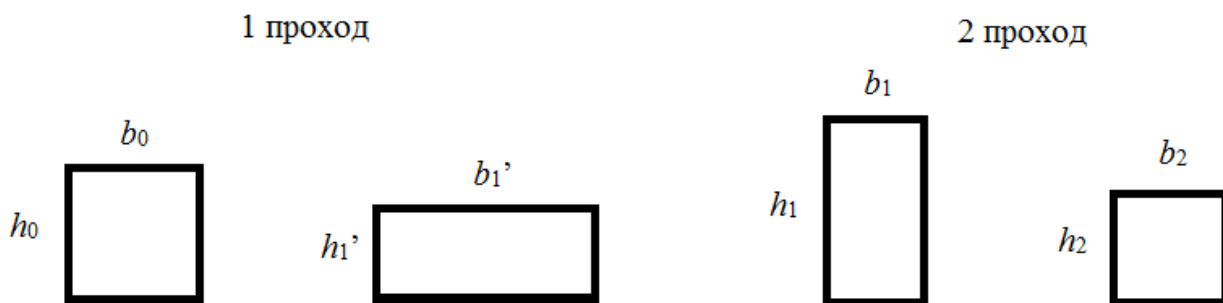


Рис. 34. Размеры сечения заготовки во время протяжки

Для первого прохода коэффициент формы $\Psi_1 = 1$, коэффициент перехода $\varphi_1 = \frac{b'_1}{h'_1} = \frac{h_1}{b_1}$. Для второго прохода коэффициент формы $\Psi_1 = \frac{h_1}{b_1} = \varphi_1$, коэффициент перехода $\varphi_2 = 1$.

Степень уковки по проходам одинакова, то есть

$$Y_1 = Y_2 = \sqrt{Y_\Sigma} = \sqrt{\frac{F_0}{F_2}} = \sqrt{\frac{h_0 b_0}{h_2 b_2}} = \sqrt{\frac{250 \cdot 250}{180 \cdot 180}} = 1,389.$$

Зададим какую-нибудь ориентировочную величину относительной подачи для первого прохода $S'_1 = 0,8$.

Тогда ориентировочная величина подачи $l'_1 = S'_1 b_0 = 0,8 \cdot 250 = 200$ мм.

В этом случае число обжатий $n_1 = \text{int}\left(\frac{L_0}{l'_1}\right) = \text{int}\left(\frac{2000}{200}\right) = 10$. Поскольку число обжатий получилось целым, пересчета величины подачи не требуется: $l_1 = l'_1 = 200$ мм.

Далее для первого прохода по табл. 12 при помощи линейной интерполяции определяем значение коэффициента боковой поверхности, соответствующее величине относительной подачи $S'_1 = 0,8$ при $\Psi_1 = 1$. Получаем $f_1 = 0,3$.

Степень деформации связана со степенью уковки известной зависимостью:

$$Y_i = \frac{1}{1 - \varepsilon_i(1 - f_i)}. \quad (61)$$

Из уравнений (57) и (61), для первого прохода имеем:

$$\frac{Y_1 - 1}{Y_1(1 - f_1)} = 1 - \frac{1 - f_1}{2\Psi_1\phi_1} - \sqrt{\left(1 - \frac{1 - f_1}{2\Psi_1\phi_1}\right)^2 - 1 + \frac{1}{\Psi_1\phi_1}}. \quad (62)$$

Решим уравнение (62) относительно ϕ_1 , получим $\phi_1 = 2$.

Площадь сечения заготовки после первого обжатия

$$F_1 = \frac{F_0}{Y_1}. \quad (63)$$

С другой стороны, поскольку $h_1 = \phi_1 b_1$, можно записать

$$F_1 = h_1 b_1 = \phi_1 b_1^2. \quad (64)$$

Приравняв правые части формул (63) и (64) и выразив b_1 получим

$$b_1 = \sqrt{\frac{F_0}{Y_1\phi_1}}. \quad (65)$$

После подстановку в формулу (65) известных значений имеем

$$b_1 = \sqrt{\frac{250 \cdot 250}{1,389 \cdot 2}} = 150 \text{ мм}, \quad h_1 = b_1\phi_1 = 150 \cdot 2 = 300 \text{ мм}.$$

После того, как определены размеры промежуточного сечения, можем рассчитать второй проход.

Для второго прохода имеем:

$$\frac{Y_2 - 1}{Y_2(1 - f_2)} = 1 - \frac{1 - f_2}{2\Psi_2\phi_2} - \sqrt{\left(1 - \frac{1 - f_2}{2\Psi_2\phi_2}\right)^2 - 1 + \frac{1}{\Psi_2\phi_2}}. \quad (66)$$

Решим уравнение (66) относительно f_2 , получим $f_2 = 0,3$.

Далее для второго прохода по табл. 12 определяем величину относительной подачи S'_2 при значении коэффициента боковой поверхности $f_1 = 0,3$, и коэффициенте формы $\Psi_1 = 1$. Получаем $S'_2 = 0,723$.

Тогда ориентировочная величина подачи при втором обжатии $l'_2 = S'_2 b_2 = 0,723 \cdot 180 = 130,14 \text{ мм}$.

В этом случае число обжатий

$$n_2 = \text{int}\left(\frac{L_0 Y_2}{l'_2}\right) = \text{int}\left(\frac{2000 \cdot 1,389}{130,14}\right) = \text{int}(21,35) = 21.$$

Скорректируем величину подачи с учетом целого числа обжатий:

$$l_2 = \frac{L_1}{n_2} = \frac{2778}{21} = 132,28 \text{ мм}.$$

Тогда относительная подача

$$S_2 = \frac{l_2}{b_1} = \frac{132,28}{150} = 0,88 \text{ мм.}$$

Рассчитаем энергозатраты на протяжку указанной заготовки.

Для первого прохода:

$$p_1 = 1,15 \cdot 100 \left(1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{250}{150} \right) = 147 \text{ МПа ;}$$

$$P_1^{\min} = p_1 b_0 l_1 = 147 \cdot 250 \cdot 200 = 7,35 \text{ МН;}$$

$$P_1^{\max} = p_1 b_1' l_1 Y_1 = 147 \cdot 300 \cdot 200 \cdot 1,389 = 12,25 \text{ МН;}$$

$$\overline{P}_1 = \frac{7,35 + 12,25}{2} = 9,8 \text{ МН;}$$

$$A_{1\Sigma} = 9,8 \cdot (250 - 150) \cdot 10 = 9,8 \text{ кДж.}$$

Для второго прохода:

$$p_2 = 1,15 \cdot 147 \left(1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{300}{180} \right) = 216 \text{ МПа ;}$$

$$P_2^{\min} = p_2 b_1 l_2 = 216 \cdot 150 \cdot 132,28 = 4,28 \text{ МН;}$$

$$P_1^{\max} = p_2 b_2 l_2 Y_2 = 216 \cdot 250 \cdot 132,28 \cdot 1,389 = 9,92 \text{ МН;}$$

$$\overline{P}_2 = \frac{4,28 + 9,92}{2} = 7,2 \text{ МН;}$$

$$A_{2\Sigma} = 7,2 \cdot (300 - 180) \cdot 21 = 18,1 \text{ кДж.}$$

Таким образом, чтобы протянуть заготовку квадратного сечения размерами 250×250 мм длиной 2 м на квадрат размерами 180×180 необходимо сначала обжать ее до высоты 150 мм (10 обжатий с подачей 200 мм), а затем кантовать и обжать до высоты 180 мм (21 обжатие с подачей 132,28 мм). Ковочное оборудование должно обеспечить усилие минимум 12,25 МН с учетом коэффициентов запаса. Суммарная работа протяжки составит 27,9 кДж.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО АНАЛИЗУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1. Выбрать рациональный технологический вариант производства штампованных стальных мелющих шаров из непрерывнолитой заготовки. Объем производства до 12 тыс. т в год.
2. Рассмотреть возможные варианты и выбрать из них наиболее прогрессивный для организации производства роликов для нагруженных роликовых подшипников. Объем 2 млн. шт. в год.
3. Современное состояние производства стальных горячекатаных особо тонких листов. Проблемы внедрения наиболее перспективных технологических вариантов.
4. Выявить наиболее перспективные технологии производства стальных заготовок для изготовления бесшовных труб. Объем производства до 200 тыс. т в год.
5. Выбрать и обосновать рациональность технологии резки непрерывнолитых круглых в сечении заготовок диаметром от 120 до 250 мм на выходе из горизонтальной МНЛЗ.
6. Предложить технологический вариант и выбрать современное оборудование для производства алюминиевой фольги толщиной 0,007 мм. Объем производства до 10 тыс. т в год.
7. Описать, начиная с выплавки металла, технологию производства циркониевых труб для оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. Объем производства до 20 тыс. т в год.
8. Сопоставить технологии изготовления труб из меди и медных сплавов, включающие как варианты прокатки на станах ХПТ, ХПТР и волочение. В каких случаях каждый из этих вариантов можно считать целесообразным.
9. Сравнить во всех технологических аспектах волочение стальной среднеуглеродистой проволоки на следующих волочильных станах: петлевой; прямоточный; магазинного типа (с накоплением проволоки на барабанах); со скольжением проволоки на барабанах.
10. Предложить полную (от разливки металла до сдачи готовой продукции) технологическую схему производства бурильных труб из алюминиевых термоупрочняемых сплавов. Объем производства до 12 тыс. т в год.

11. Выбрать наиболее перспективную технологию изготовления микропровода диаметром 0,030–0,008 мм из высоколегированных сталей аустенитного класса. Объем производства до 50 кг в год.

12. Предложить рациональную технологию и выбрать оборудование для производства биметаллической сталеалюминевой проволоки диаметром от 3,0 до 2,5 мм (алюминий – плакирующий слой). Объем производства до 1,5 тыс. т в год.

13. Выбрать наиболее производительный технологический вариант изготовления биметаллической сталемедной проволоки (медь – плакировка) и описать необходимое оборудование для организации производства объемом до 20 тыс. т в год.

14. Предложить рациональную технологию производства из непрерывнолитой заготовки колючей проволоки общего применения. Объем производства до 5 тыс. т в год.

15. Выбрать перспективный технологический вариант и назначить оборудование для производства стальных шариков для шарикоподшипников. Объем производства до 2 млн. шт. в год.

16. Предложить технологическую схему изготовления из непрерывнолитых заготовок железнодорожных костылей. Объем производства до 2 млн. шт. в год.

17. Предложить технологический вариант промышленного изготовления многожильных сверхпроводящих кабелей с медной матрицей и ниобий-титановыми жилами. Объем производства до 500 т в год. Диаметр кабелей от 2,5 до 0,8 мм.

18. Найти наиболее рациональный с точки зрения качества производимых бесшовных труб способ изготовления полых стальной заготовки.

19. Предложить промышленно пригодные варианты утилизации сухой металлургической окалины и технологии выпуска качественной металлопродукции. Годовой объем перерабатываемой окалины до 50 тыс. т.

20. Обсудить во всех технологических аспектах промышленное внедрение волочения стальной проволоки в гидродинамическом режиме трения.

21. Описать, проанализировать технологические аспекты и выявить области наиболее эффективного применения волочения проволоки из черных и цветных металлов, совмещенного с непрерывным электроконтактным отжигом.

22. Предложить сквозную технологию производства стальной низкоуглеродистой ленты толщиной 1–2 мм и шириной до 50 мм из металлолома, совмещающую плавку, непрерывную разливку и прокатку. Объем производства до 5 тыс. т в год.

23. Предложить опытно-промышленную технологию изготовления холоднотянутой проволоки из титана и низколегированных титановых сплавов.

24. Проанализировать известные технологии производства сварных труб большого диаметра и наиболее рациональный вариант рекомендовать для промышленного использования, например, в условиях Нижнетагильского металлургического комбината.

25. Сопоставить технологии производства сортовой стали на мелкосортных станах, использующие в качестве исходной непрерывнолитую и катаную заготовку.

26. Проанализировать известные технологии подготовки поверхности стальной высокоуглеродистой проволоки к волочению и описать комплекс организационно-технических мероприятий по внедрению наиболее рациональной технологии подготовки проволоочной заготовки в условиях крупнотоннажного производства.

27. Предложить прогрессивный технологический вариант изготовления швейных игл, например, из стали У10. Годовой объем производства до 10 млн. шт. в год. Исходная заготовка – катанка.

28. Предложить наиболее прогрессивную технологию изготовления медного контактного провода из катодной меди. Объем производства до 250 тыс. т в год.

29. Провести сопоставление во всех технологических и экономических аспектах известные и вновь предлагаемые технологии производства коллекторных полос из сплава меди с кадмием из полунепрерывнолитой, круглой в сечении заготовки. Объем производства до 60 тыс. т в год.

30. Предложить промышленную технологию изготовления заготовок стволов огнестрельного стрелкового оружия. Объем производства до 50 тыс. шт. в год.

31. Предложить какой-либо вариант совершенствования технологии изготовления цельнокатаных железнодорожных колес, например, в условиях колесопрокатного цеха НТМК. Производительность линии не менее 90 колес в час.

32. Предложить вариант технологии изготовления методами ОМД спиральной ленты для изготовления шнеков подачи сыпучих мате-

риалов. Производительность линии изготовления шнековых спиралей до 20 шт. в час.

33. Описать классическую технологию изготовления твердосплавного волочильного инструмента и наметить современное направление ее совершенствования.

34. Проанализировать промышленные технологии производства труб большого диаметра нефтегазового сортамента.

35. Предложить технологический вариант горячей прокатки рессорной полосы переменного по длине сечения из заготовки квадратного поперечного сечения 125×125 мм. Объем производства до 250 тыс. т в год.

36. Предложить технологический вариант и обосновать его рациональность изготовления изотропных цинковых листов размерами 0,5×((400...300)–(500...600)) мм; объем производства до 200 т в год.

37. Рекомендовать к промышленному внедрению рациональную технологию изготовления свинцовой дроби диаметром от 8 до 1,5 мм; объем производства 200 т в год.

38. Предложить вариант промышленной технологии изготовления заготовок коленчатых валов грузовых автомобилей класса «КАМАЗ». Объем производства до 150 тыс. шт. в год.

39. Определить перспективные области промышленного применения штамповки машиностроительных заготовок из расплава; наметить как можно более широкий сортамент штамповок, изготовление которых из расплава целесообразно в серийном производстве.

40. Проанализировать технологические особенности волочения проволоки, прутков и труб с противонатяжением. Выявить все варианты применения противонатяжения на существующих волочильных станах. Предложить варианты применения противонатяжения при волочении труб.

41. Предложить технологический вариант изготовления сеток типа «рабица». В качестве заготовки принять стальную низкоуглеродистую катанку. Объем производства до 2000 м² в год.

42. По литературным данным установить современную технологическую схему производства белой жести и указать перспективы развития производства жести в аспектах увеличения производительности и повышения качества.

43. Предложить вариант современной технологии производства стальной оцинкованной проволоки в диапазоне диаметров от 5,0 до 2,4 мм. Объем до 60 тыс. т в год.

44. Сопоставить технологии механического удаления окалины с углеродистой катанки и проволоки перед волочением. Указать области рационального промышленного использования дробеструйной обработки катанки и способы протяжки проволоочной заготовки через роликовые устройства.

45. Предложить перспективный вариант промышленного производства биметаллических труб из углеродистых сталей с нержавеющей внутренней плакировкой в диапазоне наружных диаметров от 50 до 16 мм и толщиной стенки 3,5 до 1,5 мм с соотношением толщин слоев 1:1. Объем до 60 тыс. т в год.

46. Предложить вариант технологического процесса, наиболее перспективный с точки зрения точности изготовления, изготовления стальных колец в диапазоне наружных диаметров от 800 до 1200 мм и сечением $(20...30) \times (20...30)$ мм. Объем производства до 200 тыс. шт. в год.

47. Проанализировать существующие технологии радиального обжатия стальных заготовок в условиях горячей деформации и предложить наиболее перспективные варианты технологии и тип ковочной машины для обработки с литейного нагрева непрерывнолитой заготовки, полученной на горизонтальной МНЛЗ.

48. Проанализировать технологические возможности гидроэкструзии и предложить вариант изготовления заготовок шестерен из бериллиевой бронзы (диаметры делит окр. от 12 до 25 мм и модули от 0,5 до 1,0). Объем производства до 500 шт. в месяц.

49. Предложить современную сквозную промышленную технологию производства вольфрамовой проволоки для нитей ламп накаливания. Исходная заготовка – слиток диаметром 200 мм, полученный методом электронно-лучевого переплава. Объем производства до 300 кг в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ДЛЯ БОЛЕЕ ГЛУБОКОГО ОСВОЕНИЯ МАТЕРИАЛА

1. Логинов Ю.Н. Технология прессования специальных сплавов в решениях задач: учебное пособие/ Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 69 с.
2. Логинов Ю.Н. Технология листовой прокатки специальных сплавов в решениях задач: учебное пособие/ Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин. – Екатеринбург: УГТУ, 2004. – 55 с.
3. Логинов Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы: учебное пособие. – Екатеринбург: УГТУ, 2006. – 136 с.
4. Логинов Ю.Н. Процессы обработки металлов давлением в ювелирном деле: учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ, 2005. – 54 с.
5. Логинов Ю.Н. Энергоемкость и энергосбережение в процессах пластической обработки специальных сплавов/ Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин. – Екатеринбург, 2006. – 43 с.
6. Логинов Ю.Н. Механика валкового брикетирования/ Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин, Н.А. Бабайлов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2005. – 220 с.
7. Ландихов А.Д. Производство труб, прутков и профилей из цветных металлов и сплавов/ А.Д. Ландихов. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
8. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов/ П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
9. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением/ А.В. Третьяков, Г.К. Трофимов, В.И. Зюзин. – М.: Металлургия, 1974. – 222 с.
10. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справочник/ А. Хензель, Т. Шпиттель. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
11. Целиков А.И. Теория прокатки: справочник/ А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
12. Когос А.М. Механическое оборудование волочильных и лентопрокатных цехов/ А.М. Когос. – М.: Металлургия, 1980. – 312 с.
13. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов/ Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. – М.: Металлургия, 1972. – 480 с.

14. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справочник/ Под ред. В.А.Ливанова. М.: Металлургия, 1974. 432 с.
15. Кроха В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации: справочник/ В.А. Кроха. – М.: Металлургия, 1968. – 131 с.
16. Шевакин Ю.В. Повышение эффективности производства труб из цветных металлов/ Ю.В. Шевакин, А.М. Рытиков. – М.: Металлургия, 1968. – 356 с.
17. Крупин А.В. Пластическая деформация тугоплавких металлов/ А.В. Крупин, В.Я. Соловьев. – М.: Металлургия, 1971. – 352 с.
18. Маковский В.А. Основы теории и практики производства биметаллических прутков/ В.А. Маковский, Л.С. Ейльман. – М.: Металлургия, 1971. – 192 с.
19. Паршин В.С. Машины и агрегаты для обработки цветных металлов и сплавов/ В.С. Паршин, В.П. Костров, Б.С. Сомов и др. – М.: Металлургия, 1988. – 400 с.
20. Микляев П.Г. Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением: справочник/ П.Г. Микляев. – М.: Металлургия, 1994. – 288 с.
21. Полухин П.И. Технология процессов обработки металлов давлением/ П.И. Полухин, А. Хензель, В.П. Полухин и др. – М.: Металлургия, 1988. – 408 с.
22. Колпашников А.И. Прокатка листов из легких сплавов/ А.И. Колпашников. – М.: Металлургия, 1979. – 264 с.
23. Головин В.А. Листы и ленты из тяжелых цветных металлов/ В.А. Головин, Г.Н. Кручер. – М.: Металлургия, 1985. – 384 с.
24. Злотин Л.Б. Производство листов и лент из меди, никеля и их сплавов/ Л.Б. Злотин, О.И. Качайник, С.И. Портной. – М.: Металлургия, 1978. – 232 с.
25. Серебренников В.Н. Горячая прокатка тяжелых цветных металлов/ В.Н. Серебренников, А.Ф. Мельников. – М.: Металлургия, 1977. – 264 с.
26. Меерович И.М. Прокатка плит и листов из легких сплавов/ И.М. Меерович. – М.: Металлургия, 1969. – 252 с.
27. Черняк С.Н. Производство фольги/ С.Н. Черняк, В.И. Карасевич. – М.: Металлургия, 1969. – 272 с.
28. Шор Э.Р. Производство листов из алюминиевых сплавов/ Э.Р. Шор, А.И. Колпашников. – М.: Металлургия, 1967. – 319 с.

29. Черняк С.Н. Бесслитковая прокатка алюминиевой ленты/ С.Н. Черняк, П.А. Коваленко, В.Н. Симонов. – М.: Металлургия, 1976. – 136 с.
30. Степанов А.Н. Производство листов из расплава/ А.Н. Степанов, Ю.В. Зильберг, А.А. Неустроев. – М.: Металлургия, 1978. – 160 с.
31. Полухин П.П. Прокатка на многовалковых станах/ П.П. Полухин, В.П. Полухин, А.Ф. Пименов и др. – М.: Металлургия, 1981. – 248 с.
32. Смирнов В.К. Деформация и усилия в калибрах простой формы/ В.К. Смирнов, В.А. Шилов, К.И. Литвинов. – М.: Металлургия, 1982. – 144 с.
33. Ерманок М.З. Прессование труб из алюминиевых сплавов/ М.З. Ерманок, Л.С. Каган, М.Ф. Голованов. – М.: Металлургия, 1976. – 248 с.
34. Ерманок М.З. Прессование панелей из алюминиевых сплавов/ М.З. Ерманок. – М.: Металлургия, 1974. – 232 с.
35. Ерманок М.З. Прессование титановых сплавов/ М.З. Ерманок, Ю.П. Соболев, А.А. Гельман. – М.: Металлургия, 1979. – 264 с.
36. Грабарник Л.М. Прессование цветных металлов и сплавов/ Л.М. Грабарник, А.А. Нагайцев. – М.: Металлургия, 1983. – 240 с.
37. Ерманок М.З. Прессование профилей из алюминиевых сплавов/ М.З. Ерманок, В.И. Фейгин, Н.А. Сухоруков. – М.: Металлургия, 1977. – 264 с.
38. Манегин Ю.В. Горячее прессование труб и профилей/ Ю.В. Манегин, Л.Е. Притоманов, Т. Шпиттель, А. Кнаушнер. – М.: Металлургия, 1980. – 272 с.
39. Колпашников А.И. Гидропрессование металлов/ А.И. Колпашников, В.А. Вялов. – М.: Металлургия, 1973. – 296 с.
40. Буркин С.П. Технология прессования специальных сплавов: вопросы и задачи/ С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов. – Свердловск: УПИ. 1991. – 35 с.
41. Горловский М.Б. Оборудование и инструмент для волочения стальной проволоки/ М.Б. Горловский. – М.: Металлургия, 1960. – 260 с.
42. Северденко В.П. Основы теории и технологии волочения проволоки из титановых сплавов/ В.П. Северденко, В.З. Жилкин. – Минск: Наука и техника, 1970. – 203 с.

43. Брабец В.И. Проволока из тяжелых цветных металлов и сплавов/ В.И. Брабец. – М.: Metallurgy, 1984. – 296 с.
44. Шапиро В.Я. Бухтовое волочение труб/ В.Я. Шапиро, В.И. Уральский. – М.: Metallurgy, 1972. – 264 с.
45. Коликов А.П. Прокатка и прессование труб из тугоплавких металлов/ А.П. Коликов, П.Н. Потапов, П.И. Полухин. А.В. Крупин. – М.: Metallurgy, 1979. – 240 с.
46. И.Ш. Производство медной и алюминиевой проволоки/ И.Ш. Берин, Н.З. Днестровский. – М.: Metallurgy, 1975. – 200 с.
47. Паршин В.С. Холодное волочение труб/ В.С. Паршин, А.А. Фотов, В.А. Алешин. – М.: Metallurgy, 1979. – 240 с.
48. Савин Г.А. Волочение труб/ Г.А. Савин. – М.: Metallurgy, 1982. – 160 с.
49. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб/ Ю.Ф. Шевакин. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 269 с.
50. Станкевич В.А. Холодная прокатка труб/ В.А. Станкевич, А.П. Усенко, А.А. Павлов. – М.: Metallurgy, 1982. – 256 с.
51. Красильников Л.А. Волочильщик проволоки/ Л.А. Красильников, А.Г. Лысенко. – М.: Metallurgy, 1987. – 320 с.
52. Буркин С.П. Технология волочения специальных сплавов: вопросы и задачи/ С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов. – Свердловск: УПИ. 1991. – 35 с.
53. Виноградов Г.А. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул/ Г.А. Виноградов, В.П. Каташинский. – М.: Metallurgy, 1979. – 224 с.
54. Логинов Ю.Н. Технология производства заготовок из твердых сплавов: учебное пособие/ Ю.Н. Логинов. – Свердловск, УПИ. 1984. – 53 с.
55. Кипарисов С.С. Порошковая металлургия/ С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. – М.: Metallurgy, 1980. – 496 с.
56. Логинов Ю.Н. Технология волокнистых композиционных материалов: учебное пособие/ Ю.Н. Логинов. – Свердловск: УПИ, 1990. – 72 с.
57. Сторожев М.В. Технологияковки и горячей штамповки цветных металлов и сплавов/ М.В. Сторожев, П.И. Середин, С.Б. Кирсанов. - М.: Высшая школа, 1987. - 352 с.
58. Никольский Л.А. Горячая штамповка заготовок из титановых сплавов/ Л.А. Никольский. - М.: Машиностроение, 1964. - 228 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буркин С.П. Ресурсо- и энергосбережение в металлургии. Разработка машин и технологий при инновационном риске: учебник/ С.П. Буркин, Е.А. Коршунов, В.В. Шимов и др. В 2 кн. Кн.1. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 498 с.
2. Минимизация потребностей мощности при производстве стального проката на литейно-деформационных модулях/ Е.А. Коршунов, Е.Х. Шахпазов, В.К. Смирнов, Н.А. Бабайлов и др.// Сталь. 1966. № 6. С. 29–33.
3. Логинов Ю.Н. Технология прессования и листовой прокатки специальных сплавов в решениях задач: учебное пособие/ Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин. Екатеринбург: УГТУ, 2004. 120 с.
4. Смирнов В.К. Калибровка прокатных валков/ В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инатович. М.: Металлургия, 1987. 368 с.
5. Буркин С.П. Особенности волочения специальных сплавов: учебное пособие/ С.П. Буркин. Свердловск: УПИ, 1985. 108 с.
6. Леванов А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением /А.Н.Леванов, В.Л.Колмогоров, С.П.Буркин и др. М.: Металлургия, 1976. 416 с.
7. Грудев А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник/ А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. М.: Металлургия, 1982. 312 с.
8. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов/ О.А. Кайбышев. М.: Металлургия. 1975. 280 с.
9. Грабский М.В. Структурная сверхпластичность металлов/ М.В. Грабский. М.: Металлургия. 1975. 280 с.
10. Давиденков Н.Н. Рентгенография в применении к исследованию материалов / Н.Н. Давиденков. М.: ОНТИ, 1936. 248 с.
11. Косолапов Г.Ф. Рентгенография/ Г.Ф. Косолапов. М.: Высшая школа, 1962. 332 с.
12. Немец Я. Жесткость и прочность стальных деталей/ Я Немец. М.: Машиностроение, 1970. 528 с.
13. Перлин И.Л. Теория волочения/ И.Л. Перлин, М.З. Ерманок. М.: Металлургия, 1971. 448 с.
14. Биргер И.А. Остаточные напряжения/ И.А. Биргер. М.: Машгиз. 1963. 232 с.

15. Колмогоров, Г.Л. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий: моногр./ Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова, В.В. Тиунов. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. 226 с.

16. Анализ способов определения и устранения остаточных напряжений в трубных заготовках / С.П. Буркин [и др.] // Достижения теории и практики трубного производства: сб. науч. тр. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. С. 87-97.

Учебное издание

Шимов Георгий Викторович

Буркин Сергей Павлович

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Редактор – *И. В. Коршунова*

Компьютерный набор – *Г. В. Шимова*

Компьютерная верстка – *Т. С. Криницина*

Подписано в печать 25.06.2014. Формат 70х100 ¹/₁₆.

Бумага писчая. Плоская печать. Гарнитура с Times New Roman.

Усл. печ. л. 12,9. Уч.-изд. л. 8,73. Тираж 100 экз. Заказ № 1439.

Издательство Уральского университета

Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ

620049, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5

E-mail: rio@mail.ustu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ

620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4

E-mail: press-urfu@mail.ru